

**DESARROLLO DE UN TRANSDUCTOR DE TORQUE DE BAJO COSTO,
UTILIZANDO GALGAS EXTENSIONOMÉTRICAS Y PROTOCOLOS DE
COMUNICACIÓN DEL INTERNET DE LAS COSAS**

ABRAHAM ANDRÉS CORREA HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2020**

**DESARROLLO DE UN TRANSDUCTOR DE TORQUE DE BAJO COSTO,
UTILIZANDO GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS Y PROTOCOLOS DE
COMUNICACIÓN DEL INTERNET DE LAS COSAS**

ABRAHAM ANDRÉS CORREA HERNÁNDEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener
el título de Magíster en Ingeniería**

Asesor: Francisco Javier Botero Herrera

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN**

2020

Nota de aceptación:

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Medellín, mayo de 2020

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. MARCO CONCEPTUAL	17
4.1 TRANSDUCTOR DE TORQUE	17
4.2 TIPOS DE TRANSDUCTORES DE TORQUE	17
4.2.1 Estáticos o reactivos	17
4.2.2 Dinámicos o rotativos	18
4.3 GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS	19
4.4 PUENTE WHEATSTONE	20
4.5 TORSIÓN	21
4.6 ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO A TORSIÓN	22
4.7 ESFUERZO CORTANTE PROMEDIO A TORSIÓN	23
4.8 LEY DE HOOKE	24
4.8.1 Ecuaciones para una sola dimensión	25
4.8.2 Ecuaciones para dos dimensiones	25
4.9 TEORÍA DE VON MISES-HENCKY O DE ENERGÍA DE DISTORSIÓN	26
4.10 FACTOR DE SEGURIDAD	27
4.11 INTERNET DE LAS COSAS (IOT)	27
4.12 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN TCP/IP	28
4.12.1 Capas del protocolo TCP/IP	28
4.13 SOCKET	30
5. ESTADO DEL ARTE	31
6. METODOLOGÍA	33
6.1 RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA	33

6.2 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO	33
6.3 COMPARACIÓN DE MICROCONTROLADORES MEDIANTE APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO CONCEPTUAL	33
6.4 DISEÑO MEDIANTE HERRAMIENTA CAD 3D	33
6.5 MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	34
6.6 ELABORACIÓN DETALLADA DE LOS PLANOS DE FABRICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	34
6.7 DESARROLLO DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN E INTERFAZ GRAFICAS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.....	34
7. RESULTADOS	35
7.1 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO.....	35
7.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	36
7.3 DISEÑO MEDIANTE HERRAMIENTA CAD 3D	42
7.4 MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	47
7.4.1 Modelo matemático	47
7.4.2 Modelos del esfuerzo cortante máximo	48
7.4.3 Modelos del esfuerzo cortante promedio.....	51
7.5 SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	54
7.6 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OPTENIDOS A PARTIR DEL MODELO MATEMÁTICO Y MODELO COMPUTACIONAL	59
7.7 SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE FRECUENCIAS RESONANTES.....	60
7.8 DESARROLLO DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN E INTERFAZ GRAFICAS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.....	66
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
9. CONCLUSIONES	77
10. RECOMENDACIONES.....	79
11. BIBLIOGRAFIA	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de variables de las ecuaciones 1 y 2.....	23
Tabla 2. Descripción de variables de las ecuaciones 3 y 4.....	24
Tabla 3. Descripción de variables de las ecuaciones 5 a la 10.....	25
Tabla 4. Descripción de variables de las ecuaciones 11	26
Tabla 5. Descripción de variables de las ecuaciones 12	27
Tabla 6. Lista de alternativas	37
Tabla 7. Objetivos generales y específicos.....	38
Tabla 8. Criterios de ponderación[26]	38
Tabla 9. Comparación de los objetivos de primer nivel y determinación del peso ponderado de cada uno de ellos	39
Tabla 10. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de costos	39
Tabla 11. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de diseño	40
Tabla 12. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de programación	40
Tabla 13. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de medio ambiente	40
Tabla 14. Evaluación de cada propuesta con los requerimientos del diseño.....	41
Tabla 15. Propiedades mecánicas del aluminio 6061 T6.....	48
Tabla 16. Porcentaje de error de los resultados del modelo teórico vs computacional.....	59
Tabla 17. Frecuencia de resonancia <i>del dispositivo</i> a una velocidad de rotación de 3600 RP	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Transductor de torque estático marca FUTEK modelo FSH00605	17
Figura 2. Transductor de torque dinámico FUTEK modelo FSH02052	18
Figura 3. Partes internas de un transductor de torque dinámico.....	19
Figura 4. Esquema de montaje de galgas sobre celda de carga	20
Figura 5. Diagrama de puente de Wheatstone.	21
Figura 6. Eje sometido a momento torsor	21
Figura 7. Comportamiento del esfuerzo cortante en un eje de sección circular con diámetro constante.....	22
Figura 8. Sección transversal para el cálculo de esfuerzo cortante promedio a torsión	23
Figura 9. Transmisión y recepción de datos del sistema principal del protocolo TCP/IP	29
Figura 10. Imagen Renderizada de la vista superior del tubo central del dispositivo.	43
Figura 11. Imagen renderizada de la vista superior y lateral de las tapas laterales del dispositivo.....	44
Figura 12. Imagen renderizada de la vista isométrica de las chapetas.....	45
Figura 13. Imagen renderizada de la vista isométrica del acople.	45
Figura 14. Imagen renderizada de la vista frontal del soporte RASPBERRY	46
Figura 15. Imagen renderizada de la vista isométrica del dispositivo.	47
Figura 16. Corte de sección del tubo central.	48
Figura 17. Circulo de Morh del modelo de cortante máximo.....	49
Figura 18. Estado del elemento diferencial para el modelo de esfuerzo máximo. .	50
Figura 19. Circulo de Morh del modelo de cortante promedio.	52

Figura 20. Estado del elemento diferencial para el modelo de esfuerzo promedio.	52
Figura 21. Simplificación del tubo central y colocación de eje medio.	54
Figura 22. Definición de restricciones geométricas del tubo central.	55
Figura 23. Definición de carga torsional de 30 Nm.	56
Figura 24. Comportamiento de la independencia del mallado del tubo central.	56
Figura 25. Mallado del tubo central con dimensiones de elementos de 1 mm.	57
Figura 26. Distribución de esfuerzos de Von Misses.	57
Figura 27. Distribución de deformaciones unitarias.	58
Figura 28. Distribución de factor de seguridad.	58
Figura 29. Vista isométrica del dispositivo.	61
Figura 30. Definición de contactos entre elementos del ensamble.	61
Figura 31. Definición de restricciones tipo rodamiento radiales rígidos.	62
Figura 32. Definición de la carga de velocidad rotacional.	63
Figura 33. Mallado con dimensión de elemento de 5 mm y refinamiento de malla en los tornillos.	63
Figura 34. Distribución de amplitudes promedio modelo 1.	64
Figura 35. Distribución de amplitudes promedio modelo 2.	64
Figura 36. Distribución de amplitudes promedio modelo 3.	65
Figura 37. Programa en PYTHON para la recolección de datos del HX 711 mediante línea de comando local.	67
Figura 38. Diagrama de montaje de los diferentes componentes electrónicos.	68
Figura 39. Diagrama de conexión electrónica de HX 711 al RASPBERRY.	69
Figura 40. Interfaz de línea de comandos local mediante software libre PUTY.	69
Figura 41. Lista de valores de prueba recibidos a través del software PUTY.	70
Figura 42. Programa en PYTHON para el envío de datos mediante protocolo TCP/IP.	71

Figura 43. Programa en LABVIEW para la recolección de datos mediante protocolo TCP/IP.....	72
Figura 44. Diagrama de flujo del programa en LABVIEW.....	72
Figura 45. Interfaz en LABVIEW para la recolección de datos.	73
Figura 46. Datos de prueba recibidos en la interfaz de LABVIEW mediante protocolo TCP/IP.....	74
Figura 47. Interfaz de enlace a través de LABVIEW DASHBOARD.	75

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un transductor de torque de bajo costo con capacidad de realizar el envío de datos, en tiempo real, a múltiples dispositivos, por medio de la aplicación de protocolos de comunicación del internet de las cosas.

Para hacer posible este desarrollo, como primer paso fue necesario recopilar información bibliográfica sobre desarrollos similares, el segundo paso consistió en definir los parámetros de funcionamiento bajo los cuales se diseñaría el prototipo. Definidos los parámetros de diseño, como tercer paso, se procedió a hacer una comparación cuantitativa de los diferentes microcontroladores de bajo costo con el fin de determinar cual es el más adecuado, para luego proceder a realizar el diseño conceptual de los diferentes componentes del transductor, mediante la herramienta CAD.

Con los diseños preliminares concluidos, se procedió a realizar la solución de los modelos matemáticos que describen el comportamiento del torque y al mismo tiempo, se hizo la simulación por elementos finitos del transductor. Los resultados obtenidos de los modelos matemáticos y los resultados de la simulación, fueron comparados para determinar si la simulación describe los efectos sufridos por el material.

Completados los análisis de esfuerzos del transductor se procedió a generar los planos de fabricación y, al mismo tiempo, se inició el desarrollo de las interfaces de comunicación mediante el empleo de protocolo de comunicación del internet de las cosas.

Finalmente, se concluyó que el microcontrolador que más se adapta a las necesidades establecidas para el desarrollo del transductor es el RASPBERRY PI ZERO W, porque no necesita módulos externos para el establecimiento de conexiones remotas. Los modelos matemáticos y simulaciones por elementos

finitos, demostraron que la aleación de aluminio 6061 T6 es capaz de soportar las condiciones de trabajo planteadas. Además, fue posible establecer comunicación de datos entre el RASPBERRY y un computador, empleando una interfaz en LABVIEW mediante el protocolo de comunicación TCP/IP.

ABSTRACT

The objective of this project was to develop a low-cost torque transducer that had the ability to send data in real time to multiple devices by applying Internet of Things communication protocols.

To begin with the development, it was first necessary to collect bibliographic information to be aware of similar developments, the second step to follow was to define the operating parameters under which the prototype would be designed.

Once the design parameters were defined, the quantitative comparison of the different low-cost microcontrollers was carried out to determine which is the most appropriate, with this step concluded, the conceptual design was carried out using the CAD tool of the different components of the transducer.

With the preliminary designs completed, we proceeded to carry out the solution of the mathematical models that describe the behavior of the torque and at the same time the finite element simulation of the transducer was performed. The results obtained from the mathematical models and the simulation results were compared to determine if the simulation describes the effects suffered by the material.

Once the stress analysis of the transducer was completed, the process of generating the manufacturing drawings began, and at the same time the process of developing the communication interfaces began using the Internet of Things communication protocol.

It was concluded that the microcontroller that is most appropriated to the needs is the RASPBERRY PI ZERO W, because it does not require an external module for establishing remote connections. Mathematical models and finite element simulations showed that the 6061 T6 aluminum alloy is capable of withstanding the proposed working conditions and it was possible to establish data communication between the RASPBERRY and a computer using an interface in LABVIEW using the TCP / IP communication protocol.

INTRODUCCIÓN

Los sensores o transductores de torque son equipos con la capacidad de convertir esfuerzos mecánicos en señales eléctricas, para lograr esta conversión emplean un conjunto de elementos capaces de modificar su resistencia eléctrica en función de la deformación sufrida (galga extensiométrica). Estos equipos por lo general son de alto costo comercial y requieren la intervención de las máquinas a las cuales se les va a realizar la medición.

Como alternativa para disminuir el costo de implementación de estos dispositivos, es necesario el desarrollo de transductores de torque que utilicen tecnologías de fácil adquisición, no requieran del desmonte de los equipos y permitan el envío de datos, a través de la internet, a múltiples dispositivos en tiempo real.

Es así como este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo de transductor de torque, con capacidad de realizar el envío de datos aplicando protocolos de comunicación del internet de las cosas en tiempo real. Para ello, es necesario comprender los principios mecánicos que permiten la determinación del torque y comprender el funcionamiento de los protocolos de comunicación del internet de las cosas, para el desarrollo de las interfaces de comunicación en tiempo real.

Esta información hace posible la definición de los criterios de diseño requeridos para la elaboración y validación de los diseños conceptuales, empleando herramientas computacionales y modelos matemáticos. Adicionalmente, estos requerimientos también permiten establecer el tipo de microcontrolador y los protocolos de comunicación que posibiliten enviar simultáneamente los datos a varios dispositivos interconectados por internet.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad la medición de torque en equipos rotodinámicos se realiza mediante la instalación de transductores entre la unidad impulsora y el elemento impulsado. Los transductores de torque comerciales presentan, por lo general, un alto costo de implementación debido a la necesidad de desmontar por completo los componentes de transmisión de potencia (cardanes). Además de que la oferta de transductores no invasivos e inalámbricos es limitada en el mercado nacional e internacional.

Por otro lado, las partes internas de los transductores de torque están conformadas por contactos deslizantes los cuales sufren alto desgaste con el tiempo. La realización de este tipo de montajes puede llegar a ser complicada, debido a que muchos de estos sistemas requieren una alineación perfecta entre ambas partes para reducir el riesgo de generación de vibraciones que lleguen a destruir los componentes internos de las máquinas.

Para eliminar por completo la necesidad de desconexión de los cardanes, se requiere implementar métodos de medición de torque que no necesiten desconectar los cardanes y que permitan el envío de datos a través de conexiones inalámbricas. Razón por la cual el presente proyecto plantea el desarrollo de un sistema de medición de torque mediante la colocación de galgas extensiométricas, adheridas sobre la superficie del eje, las cuales enviarán los datos aplicando conceptos del internet de las cosas (IoT).

Este sistema de medición, permitiría el desarrollo de una interfaz de recolección y análisis de datos en tiempo real, en múltiples plataformas; facilitaría el uso de la información para aplicaciones académicas, y permitiría, a las universidades, el acceso a equipos de recolección y análisis de datos de bajo costo.

2. JUSTIFICACIÓN

La necesidad de medir con precisión el torque generado o consumido por los equipos rotodinámicos, plantea un sinnúmero de oportunidades para el desarrollo de nuevas metodologías que permitan la medición del torque sin necesidad de realizar intervenciones que comprometan la correcta funcionalidad de los equipos.

Tal es el caso de la aplicación de galgas extensiométricas directamente adheridas sobre los cardanes, que al mismo tiempo permitan el envío de los datos obtenidos a través de internet. Esto hace necesario el diseño de un dispositivo que permita validar teóricamente su funcionalidad y la viabilidad de la integración de los elementos mecánicos y electrónicos. Lo que significaría un aumento en el conocimiento de la medición directa de torque por medio de la medición de las deformaciones mecánicas sufridas por los cardanes de las maquinas rotativas.

El primer paso que se debe seguir para el desarrollo de este prototipo es lograr verificar, mediante la aplicación de modelos matemáticos y computacionales, el comportamiento mecánico de los cardanes para así determinar la posición de las galgas extensiométricas. Adicionalmente se deberán crear programas que permitan la comunicación del dispositivo con múltiples plataformas, a través de los diferentes protocolos planteados en el internet de las cosas (IoT).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un transductor de torque de bajo costo, mediante la aplicación de galgas extensiométricas y protocolos de comunicación IoT, para la adquisición de datos en tiempo real.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los parámetros requeridos para el diseño y fabricación del dispositivo.
- Comparar las diferentes alternativas de microcontroladores, por medio de la aplicación de metodologías de diseño conceptual.
- Establecer los modelos matemáticos y computacionales que permitan el análisis del comportamiento mecánico del dispositivo.
- Desarrollar un sistema de conexión mecánica para el acople del dispositivo al eje de los equipos rotativos.
- Elaborar planos de detalle para la fabricación de los componentes del dispositivo.
- Desarrollar un programa que permita la comunicación con interfaz en LabVIEW, mediante la aplicación de protocolo TCP/IP.

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1 TRANSDUCTOR DE TORQUE

De acuerdo con las definiciones establecidas por Logicbus (2020) y Sensing (2020), los transductores de torque son dispositivos encargados de realizar la conversión de energía mecánica a señales eléctricas, mediante la deformación de galgas extensiométricas.

4.2 TIPOS DE TRANSDUCTORES DE TORQUE

4.2.1 Estáticos o reactivos

Los sensores de torque estáticos son cuerpos rígidos, sin rotación, a los cuales se acopla un conjunto de galgas extensiométricas en puente de Wheatstone completo, la conducción de datos se realiza mediante cables (Logicbus, 2020). Este tipo de sensores es utilizado para la verificación de torque residual en pernos.

Figura 1. Transductor de torque estático marca FUTEK modelo FSH00605



Fuente: (Logicbus, 2020)

4.2.2 Dinámicos o rotativos

Los sensores de torque dinámicos poseen un eje central que gira libremente con respecto al cuerpo del sensor, sobre la superficie del eje se encuentra adosado el arreglo de galgas extensiométricas y la conducción de datos se realiza mediante anillos y escobillas deslizantes (Lebow, 2006), (Sensing, 2019).

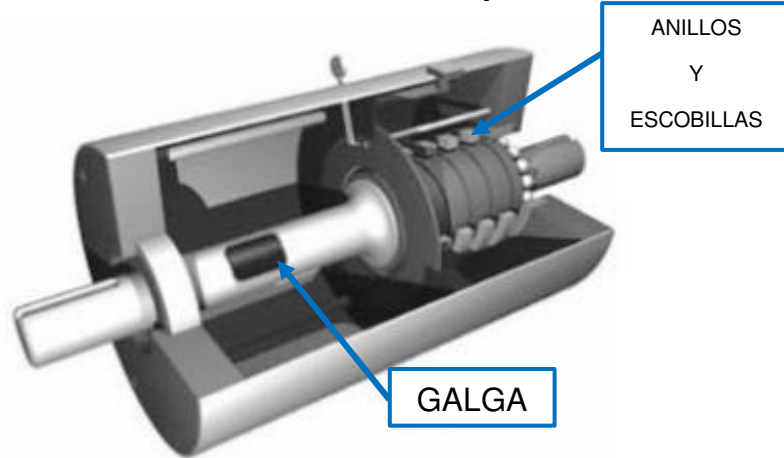
Este tipo de transductores es empleado para la verificación, en tiempo real, de la variación para la estimación de la potencia consumida en equipos de bombeo hidráulico. En las figuras 2 y 3, se pueden observar ejemplos de estos sensores.

Figura 2. Transductor de torque dinámico FUTEK modelo FSH02052



Fuente: (Logicbus, 2020)

Figura 3. Partes internas de un transductor de torque dinámico



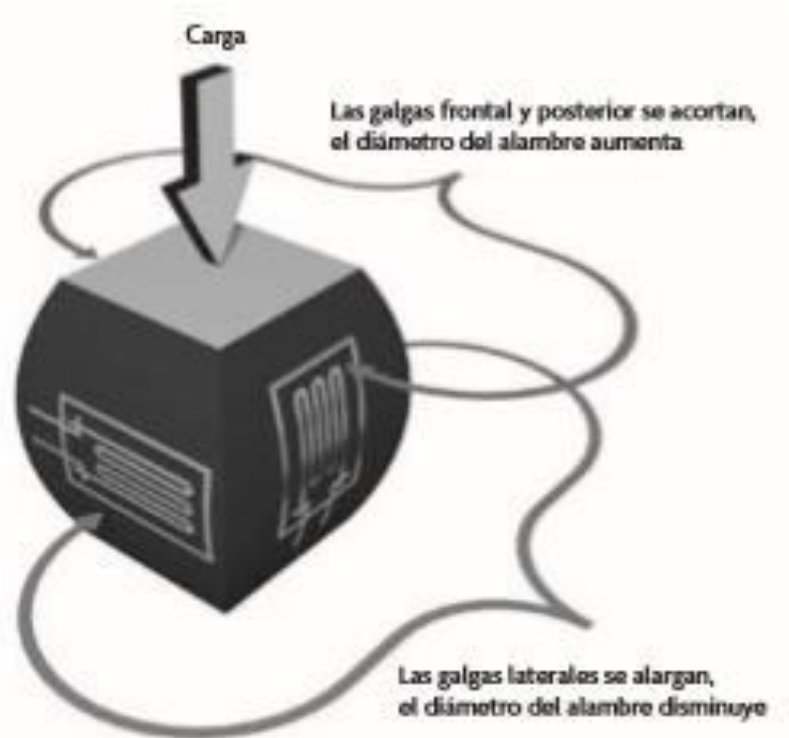
Fuente: (Ramírez, Jiménez y Carreño, 2014)

4.3 GALGAS EXTENSIONOMÉTRICAS

Las galgas extensiométricas son sensores basados en el fenómeno piezoresistivo, es decir, en la propiedad que poseen ciertos materiales para variar su resistencia al flujo de electrones cuando han sufrido deformaciones lineales (Omega, 2020), (Micro-Measurements, 2016).

Por lo general, son finas láminas de materiales semiconductores, adheridas sobre las superficies de los elementos a las cuales se les quiere realizar la medición de las deformaciones (Omega, 2020), (Hoffmann, 2009). Su función principal es la conversión de los esfuerzos mecánicos en señales eléctricas para su posterior análisis (Omega, 2020), (Hoffmann, 2009), tal como se observa en la figura 4.

Figura 4. Esquema de montaje de galgas sobre celda de carga



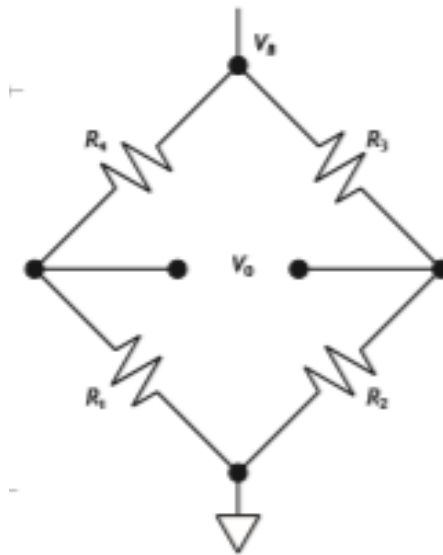
Fuente: (Ramírez, Jiménez y Carreño, 2014)

4.4 PUENTE WHEATSTONE

Es un circuito electrónico, que se emplea para realizar la medición de resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Por lo general, están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado (Hoffmann, 2009). Este circuito se observa en la figura 5.

Los circuitos de puente son utilizados para el acondicionamiento de señales de salida de sensores resistivos.

Figura 5. Diagrama de puente de Wheatstone

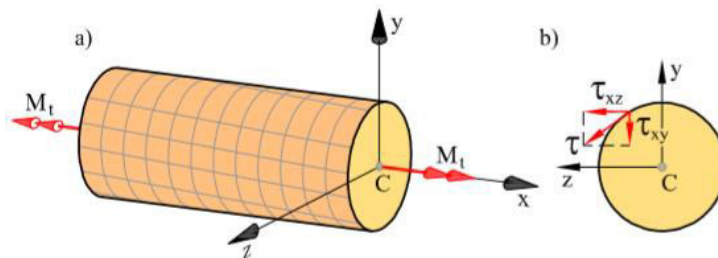


Fuente: (Ramírez, Jiménez y Carreño, 2014)

4.5 TORSIÓN

La torsión se refiere al torcimiento de un miembro estructural cuando es sometido a momentos que producen rotación con respecto a su eje longitudinal, tal como se observa en la figura 6 (Gero, 1999), (Ruiz y Díaz, 2015).

Figura 6. Eje sometido a momento torsor



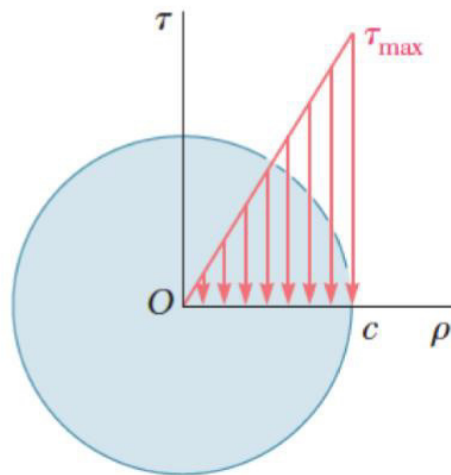
Fuente: (Ruiz y Díaz, 2015)

4.6 ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO A TORSIÓN

Cuando un eje es sometido a un momento externo, el material del que está hecho el miembro estructural desarrolla un momento de torsión interno, que es el resultado de los esfuerzos generados en el material (Gero, 1999), (Ruiz y Díaz, 2015).

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el esfuerzo cortante máximo de un elemento sometido a torsión se da en la superficie externa del eje, como se puede observar en la figura 7 (Gero, 1999), (Ruiz y Díaz, 2015).

Figura 7. Comportamiento del esfuerzo cortante en un eje de sección circular con diámetro constante



Fuente: (Gero,1999), (Ruiz y Díaz, 2015)

El esfuerzo cortante máximo en una barra de sección circular, sometida a torsión, puede determinarse de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \quad \text{[EC. 1]}$$

$$J = \frac{\pi}{32}(d_2^4 - d_1^4) \quad \text{[EC. 2]}$$

(Gero, 1999),
(Ruiz y Díaz,
2015)
(Gero, 1999),
(Ruiz y Díaz,
2015)

Donde:

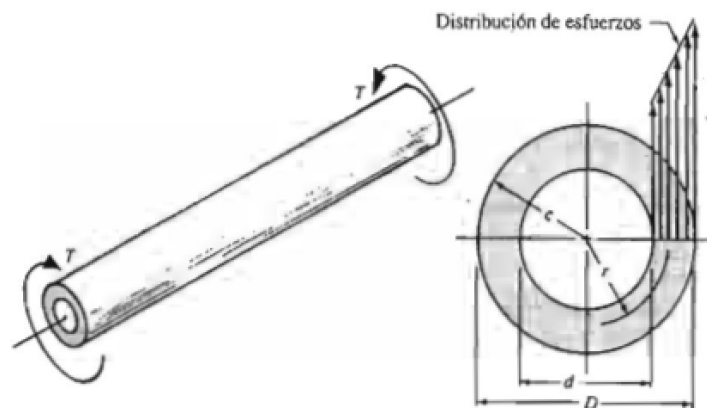
Tabla 1. Descripción de variables de las ecuaciones 1 y 2

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
τ_{max}	Torque máximo
T	Torque aplicado al elemento
c	Diámetro del eje
J	Momento polar de inercia

4.7 ESFUERZO CORTANTE PROMEDIO A TORSIÓN

De acuerdo con Gero (1999), al emplear tubos con pared delgada, con sección transversal constante, se debe tener en cuenta que el flujo cortante se genera en el área promedio de la sección transversal del tubo, como se observa en la figura 8.

Figura 8. Sección transversal para el cálculo de esfuerzo cortante promedio a torsión



Fuente: (Mott, 2006)

El esfuerzo cortante promedio depende, de manera directa, tanto del área promedio de la sección transversal como del espesor de la tuerca a utilizar, como se aprecia en las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{\text{prom}} = \frac{T}{2tA_m} \quad [\text{EC. 3}] \quad (\text{Gero, 1999})$$

$$A_m = \frac{r + r_i}{2} \quad [\text{EC. 4}] \quad (\text{Gero, 1999})$$

Donde:

Tabla 2. Descripción de variables de las ecuaciones 3 y 4

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
τ_{promedio}	Torque promedio
T	Torque aplicado al elemento
A_m	Área promedio de la sección transversal
t	Espesor del tubo
r	Radio externo del tubo
r_i	Radio interno del tubo

4.8 LEY DE HOOKE

La ley de Hooke define la proporcionalidad de las deformaciones sufridas por un sólido isotrópico al ser sometido a cargas externas. Esta ley no depende de las características geométricas del sólido sino de las propiedades mecánicas del material (Hibbeler, 2006), (Ruiz y Díaz, 2015).

De acuerdo con la ley de Hooke, se puede realizar el cálculo de las deformaciones unitarias sufridas por un sólido isotrópico resolviendo las siguientes ecuaciones:

4.8.1 Ecuaciones para una sola dimensión

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

[EC. 5]

(Hibbeler, 2006), (Ruiz y Díaz, 2015).

$$\epsilon_y = \frac{-\nu * \sigma_x}{E}$$

[EC. 6]

(Hibbeler, 2006), (Ruiz y Díaz, 2015).

$$\epsilon_z = \frac{-\nu * \sigma_x}{E}$$

[EC. 7]

(Hibbeler, 2006), (Ruiz y Díaz, 2015)

4.8.2 Ecuaciones para dos dimensiones

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \frac{-\nu}{E} * (\sigma_y + \sigma_z)$$

[EC. 8]

(Ruiz y Díaz, 2015)

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} + \frac{-\nu}{E} * (\sigma_x + \sigma_z)$$

[EC. 9]

(Ruiz y Díaz, 2015)

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} + \frac{-\nu}{E} * (\sigma_x + \sigma_y)$$

[EC. 10]

(Ruiz y Díaz, 2015)

Donde:

Tabla 3. Descripción de variables de las ecuaciones 5 a la 10

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
$\epsilon_{x,y,z}$	Deformaciones unitarias para x, y, z
E	Módulo de elasticidad
ν	Coeficientes de Poisson
σ_x	Esfuerzo normal en X
σ_y	Esfuerzo normal en Y
σ_z	Esfuerzo normal en Z

4.9 TEORÍA DE VON MISES-HENCKY O DE ENERGÍA DE DISTORSIÓN

En situaciones que implican esfuerzos a tensión y cortante, combinados que actúan sobre un mismo punto, se puede definir un esfuerzo efectivo que sirve para representar el estado del esfuerzo combinado en el sólido (Mott, 2006), (Budynas & Nisbett, 2012).

El esfuerzo de Von Mises, se define como el esfuerzo de tensión uniaxial que crearía la misma energía de distorsión que la combinación real de los esfuerzos aplicados, este enfoque permite tratar casos de esfuerzos combinados como si hubieran sido el resultado de aplicar cargas a tensión pura (Mott, 2006), (Budynas & Nisbett, 2012). De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{eq}^{VM} = \left[\begin{matrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{matrix} \right] = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2} \quad \text{[EC. 11]} \quad \begin{matrix} \text{(Mott, 2006),} \\ \text{(Budynas \& Nisbett, 2012)} \end{matrix}$$

Donde:

Tabla 4. Descripción de variables de las ecuaciones 11

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
σ_{eq}^{VM}	Esfuerzo equivalente de Von Mises
σ_x	Esfuerzo normal en la dirección X
σ_y	Esfuerzo normal en la dirección Y
τ_{xy}	Esfuerzo cortante en el plano XY

4.10 FACTOR DE SEGURIDAD

Se define el factor de seguridad, como el cociente del límite de fluencia del material y el máximo esfuerzo calculado sobre el elemento. Este coeficiente numérico sirve para identificar si el diseño y/o selección del material son aptos para las condiciones operativas del equipo (Mott, 2006), (Budynas & Nisbett, 2012).

Utiliza la siguiente ecuación:

$$N = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} \quad \text{[EC. 12]} \quad \text{(Mott, 2006), (Budynas \& Nisbett, 2012)}$$

Donde:

Tabla 5. Descripción de variables de las ecuaciones 12

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
N	Factor de seguridad
S_y	Límite de fluencia del material
σ_{eq}	Esfuerzo equivalente

4.11 INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

La internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es un sistema de dispositivos de computación interconectado e interrelacionado con máquinas mecánicas, objetos, animales o personas. Estos poseen identificadores únicos y capacidad para transferir datos a través de la internet, sin necesidad de la intervención humana (Techtarget, 2020), (Fundacion Bankinter, 2011).

En un sentido más técnico, consiste en la integración de sensores y dispositivos en objetos cotidianos que cuentan con conexión a internet a través de redes fijas e inalámbricas. La aplicación de esta interconexión de sensores, permite que la adopción masiva de la tecnología sea más accesible.

Así lo demuestra la posibilidad que existe en el mercado mundial de obtener sensores de reducido tamaño y alta precisión, que pueden ser integrados en máquinas existentes,, combinandolos con la utilización de microcontroladores y dispositivos móviles para la recepción y análisis de datos (Techtarget, 2020), (Fundacion Bankinter, 2011).

4.12 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN TCP/IP

De acuerdo con las definiciones de Robledano (2019) y Unuth (2020), se resume lo relacionado con este protocolo de comunicación.

Según ellos, este protocolo es la identificación de grupos de protocolos de red que hacen posible la transferencia de datos, en redes, entre equipos informáticos. Las siglas TCP/IP hacen referencia a este grupo de protocolos:

- **TCP:** es el protocolo de control de transmisión de datos que permite establecer la conexión y el intercambio de datos entre dos anfitriones.
- **IP o PROTOCOLO DE INTERNET:** utiliza direcciones, series de cuatro dígitos, octetos, con formato de punto decimal. Este protocolo es el encargo de realizar el transporte de datos entre computadoras conectadas a la misma red.

El protocolo TCP/IP permite el intercambio de datos fiables dentro de una red, definiendo los pasos a seguir desde que se envían los datos en paquetes hasta que son recibidos. Para ello se requiere la utilización de un sistema de capas con jerarquías.

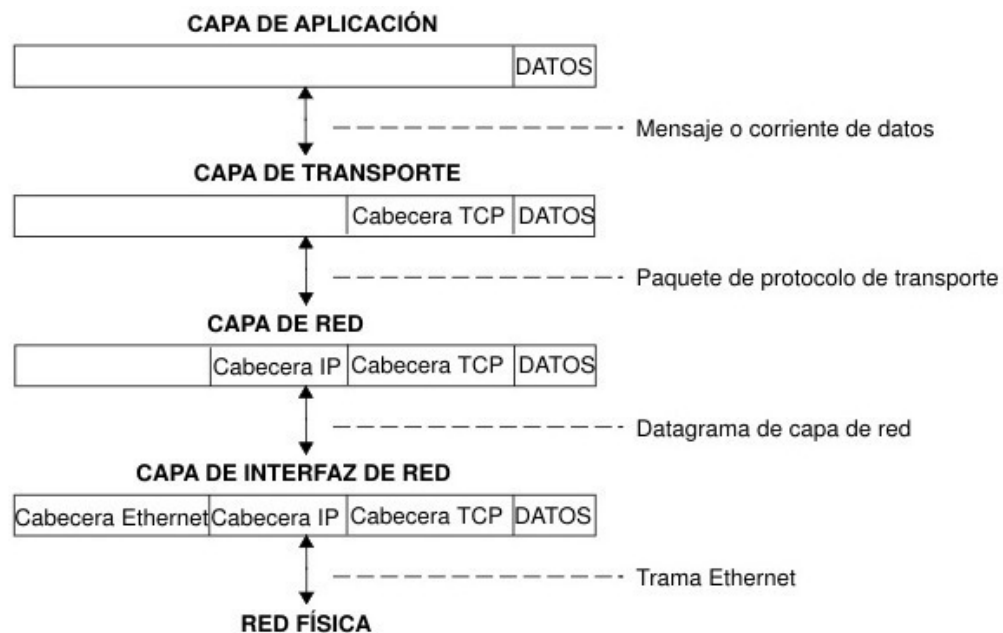
4.12.1 Capas del protocolo TCP/IP

Según Robledano(2019) y Unuth (2020), dentro del protocolo TCP/IP se encuentran cuatro capas o niveles que se deben tener en cuenta:

- **CAPA DE RED O ACCESO A LA RED:** es la primera capa del modelo y ofrece la posibilidad de accesos físicos a la red.
- **CAPA DE INTERNET:** proporciona el paquete de datos y administra las direcciones IP.
- **CAPA DE TRANSPORTE:** permite conocer el estado de la transmisión, así como de los datos de enrutamiento y la utilización de los puertos, para que sean asociados a un tipo de aplicación con su tipo de dato respectivo.
- **CAPA DE APLICACIÓN:** es la parte superior del protocolo y suministra las aplicaciones de TIP TELNET, que se encarga de la comunicación con las capas anteriores.

Estas capas del protocolo TCO/IP se pueden observar en la figura 9.

Figura 9. Transmisión y recepción de datos del sistema principal del protocolo TCP/IP



Fuente: IBM (2020 a).

4.13 SOCKET

Un SOCKET, es el punto final de un enlace de comunicación bidireccional entre dos programas que se ejecutan en la red. Este, generalmente, se encuentra vinculado a un numero de puerto para que la capa TCP pueda identificar a qué aplicación están destinados los datos que puedan ser enviados (IBM, 2020 a), (Birrerr, 2006), (IBM, 2020 b).

5. ESTADO DEL ARTE

El diseño y la fabricación de sensores de torque ha sido objeto de varias investigaciones. En el 2019 el equipo liderado por J. I. Cortés Villagra, realizó una investigación titulada: “*Un nuevo sensor de torque para caracterización de turbina hidrocínética*”, la cual consistió en el desarrollo de un sensor de torque para la caracterización de una turbina hidrocinetica empleando una celda de carga. La recolección y envío de datos fueron realizados por medio de la interconexión inalámbrica entre dos arduinos (Cortés, 2019).

Ortuño (2018) y su equipo de investigadores, realizaron el “Diseño y fabricación de un sensor de torque con 3 grados de libertad, para la retroalimentación de los sistemas de control de la plataforma móvil de un robot humanoide”. Las señales fueron generadas mediante un conjunto de galgas extensiométricas, posicionadas de tal manera que permitieran la determinación de las deformaciones unitarias para cada uno de los ejes. Los datos fueron recolectados mediante un microcontrolador STM32F407.

Ese mismo año, se realizó la investigación titulada “Diseño y construcción de un instrumento para medir la fuerza de empuje y el torque en motores de drones” por parte de Palma y Rebolledo (2018), que consistió en el diseño y fabricación de un soporte acoplado a celdas de carga, con la capacidad de determinar la fuerza de empuje y el torque generado por los motores eléctricos empleados. La recolección de datos se hizo mediante el modulo NI9219 de NATIONAL INSTRUMENTS y se utilizó una interfaz en LABVIEW para el posterior análisis de los datos.

Por otro lado, Bojtos y Szakály (2016), hicieron una investigación titulada: “Photoelastic Torque Sensor Development for Measurement of Starting Torque of a DC Micromotor”, que tuvo por objeto el desarrollo de un sensor de torque sin contactos mecánicos, para lo cual emplearon silicona transparente de calidad óptica. Para la determinación del valor del torque, realizaron mediciones de la

intensidad de la luz refractada a través del material, utilizando un láser y un sensor fotoresistivo.

Menke (2016), también presentó el trabajo titulado “Development of a Combined Measurement System for Torque and Angular Position”, en el cual desarrolló un sistema de medición de torque sin contacto, mediante la determinación de los ángulos de torsión sufridos por el eje. Para ello fueron instalados, en los extremos del eje, un conjunto independiente de encoders.

Pérez, Insignares, Charris, Aguilar y Silgado (2014), realizaron una investigación titulada “Medición del torque durante la soldadura por fricción, agitación de aluminio, mediante un sistema de detección con transmisión en tiempo real”. Este consistió en la medición, en tiempo real, del torque aplicado al usillo durante el proceso de soldadura por fricción-agitación de placas de aluminio, para ello utilizaron, como datalogger, un arduino con protocolo de comunicación XBEE y una interfaz en LABVIEW para el análisis de los datos obtenidos.

Dcruz, Patel, Labde, Kallur, y Ambhore (2013), hicieron la investigación titulada “Design , Fabrication and Analysis of Torque Transducer”. Consistió en el desarrollo de un sensor de torque en forma de cruz, en el cual adosaron un conjunto de galgas extensiométricas a 45 grados, que fue sometido a diferentes cargas para validar su funcionamiento. Los resultados obtenidos fueron posteriormente comparados con las simulaciones por elementos finitos del diseño del prototipo.

En el 2001, F. Aghili, M. Buehler, y J. M. Hollerbach, realizaron el trabajo titulado “Design of a hollow hexaform torque sensor for robot joints”, en este trabajo se desarrolló un sensor de torque de un solo eje, con alta rigidez estructural para disminuir la sensibilidad a las demás fuerzas generadas. Este sensor tiene forma de dona y es de tamaño compacto, característica que lo hace ideal para su aplicación en brazos robóticos (Aghili, Buehler y Hollerbach, 2001).

6. METODOLOGÍA

6.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Una actividad importante en la metodología de la investigación es mantener la constante búsqueda de información relevante sobre transductores de torque y sobre IOT, en revistas de ingenierías y de ciencias, para estar al día con los nuevos avances sobre estos temas.

6.2 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO

En esta etapa se definirán todos los parámetros de trabajo a los cuales estará sometido el transductor de torque durante su vida útil.

6.3 COMPARACIÓN DE MICROCONTROLADORES MEDIANTE APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO CONCEPTUAL

Se aplicarán metodologías de diseño conceptual para evaluar cualitativamente las características y especificaciones de cada una de las diferentes opciones de microcontroladores.

6.4 DISEÑO MEDIANTE HERRAMIENTA CAD 3D

Mediante la utilización del Solidworks®, se realizarán la parametrización y los planos de detalles de los componentes del transductor de torque.

6.5 MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Una vez definida la geometría y los materiales, se realizarán simultáneamente: la determinación de los esfuerzos y deformaciones unitarias, mediante la aplicación de modelos matemáticos y, las frecuencias de resonancia, por medio de simulación por elementos finitos, utilizando la herramienta Solidworks Simulation.

6.6 ELABORACIÓN DETALLADA DE LOS PLANOS DE FABRICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Cuando se concluya con el paso anterior y se cumpla con las expectativas para las cuales fue diseñado, se procederá a elaborar planos detallados que permitan la correcta fabricación del modelo. El prototipo será fabricado de acuerdo con las especificaciones anteriormente planificadas.

6.7 DESARROLLO DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN E INTERFAZ GRÁFICA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

Tan pronto se realice la selección del microcontrolador a usar, se procederá a la creación del software encargado de la interacción entre el sensor y el convertidor análogo digital y, posteriormente, el envío de datos, por medio del protocolo de comunicación seleccionado.

Adicionalmente, se creará una interfaz virtual para la recolección, análisis y almacenamiento, en tiempo real, de los datos obtenidos del transductor de torque, por medio del software LabVIEW®.

7. RESULTADOS

7.1 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO

De acuerdo con la revisión bibliográfica, las características y parámetros que debe poseer el transductor de torque deben ser los siguientes:




- Debe poseer un eje central tubular, de pared delgada, para maximizar las deformaciones unitarias sufridas por el elemento y maximizar la sensibilidad del dispositivo.
- El eje circular deberá ser de aleación de aluminio 6011 T6 para garantizar una fácil maquinabilidad y altas propiedades mecánicas, adicionalmente el material debe ser encontrado en el mercado local.
- El eje tubular deberá ser capaz de soportar un torque de diseño de 30 N.m.
- El sistema de acople al banco de prueba, deberá ser fabricado con aleación de acero AISI 1020 para aumentar la rigidez estructural del dispositivo y, al mismo tiempo, para disminuir la posibilidad de pérdidas de torque por deformaciones en el sistema de acople.
- El transductor de torque deberá poseer un diseño modular para facilitar el mantenimiento y recambio de componentes, de ser necesario.
- El transductor deberá contar con un microcontrolador, con capacidad para transmitir los datos obtenidos de manera inalámbrica.
- La interfaz de visualización de datos, deberá tener la capacidad de realizar la representación del valor obtenido en tiempo real, mediante gráficas, y contar con las herramientas que permitan exportar los datos a EXCEL para su análisis posterior.

- El transductor deberá contar con una zona de almacenaje, creada en polímero, para permitir la conexión a internet mediante WIFI.

7.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Se compararon las 3 alternativas de microcontroladores, de acuerdo con sus características técnicas, divididas en ventajas y desventajas, utilizando una técnica de pesos ponderados. Finalmente se selecciona la que obtenga el mayor puntaje, como se muestra en la tabla 6 (Díaz, Álvarez, Ariza y Barreto, 2010).

Tabla 6. Lista de alternativas

LISTA DE ALTERNATIVAS				
ITEM	ALTERNATIVA	IMAGEN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
1	ARDUINO MINI PRO		<p>Bajo costo. Dimensiones pequeñas. Diseño modular. Gran cantidad de información y librerías funcionales. Convertidor análogo digital integrado. Bajo consumo energético.</p>	<p>No cuenta con Wi-Fi. No cuenta con Bluetooth. No posee puerto USB. Baja capacidad de memoria RAM (2kb). Baja capacidad de almacenamiento (32kb). Sin regulador de voltaje. Librería HX711 funcional e inestable. Sin acceso remoto por protocolo SSH. No cuenta con SHIELDS para baterías de LIPO. Cantidad limitadas de entradas de sensores. Baja capacidad de procesamiento (16Mhz).</p>
2	WEMOS D1 MINI		<p>Bajo costo. Dimensiones pequeñas. Diseño modular. WIFI. Puerto USB. Gran cantidad de información y librerías funcionales. Convertidor análogo digital integrado. SHIELD cargador y booster de baterías. Bajo consumo energético.</p>	<p>No posee bluetooth. Baja capacidad de memoria RAM (1mb). Baja capacidad de almacenamiento (4mb). Sin regulador de voltaje. Librería HX711 funcional e inestable. Sin acceso remoto por protocolo SSH. Cantidad limitadas de entradas de sensores. Baja capacidad de procesamiento (80-160 MHz).</p>
3	RASPBERRY PI ZERO		<p>WFI. Bluetooth. Puerto USB. Regulador de voltaje por puerto USB Diseño Modular. HAT BOOSTER de batería de LIPO con apagado seguro en bajos voltajes. RAM (512 Mb). Almacenamiento por memoria SD. Velocidad de procesamiento (1 GHz) Librería HX711 estable</p>	<p>Alto Costo. Grandes dimensiones. Programación más compleja. Alto consumo energético. Menor cantidad de información de la implementación de galgas extensiométricas con convertidor HX 711.</p>

Una vez Determinadas las características propias de cada uno de los microcontroladores, se procederá a plantear una serie de objetivos que permitan evaluar cada una de ellas, tal como se muestra en en la tabla 7 (Díaz, Álvarez, Ariza y. Barreto, 2010).

Tabla 7. Objetivos generales y específicos

1. COSTOS	2. DISEÑO	3. PROGRAMACIÓN	4. MEDIOAMBIENTE
1.1 Bajos costo de inversión 1.2 Bajo costo de recambio de componentes	2.1 Menor cantidad de componentes 2.2 Utilización de componentes estándar 2.3 Componentes con conectividad PLUG AND PLAY	3.1 Estabilidad en los datos obtenidos 3.2 Librerías disponibles para implementación 3.3 Interfaz de acceso remoto	4.1 Bajo consumo energético 4.2 Componentes reutilizables

Para Definir la importancia de cada uno de estos objetivos, se deben tener en cuenta los criterios de ponderación que se muestran en la tabla 8 (Díaz, Álvarez, Ariza y. Barreto, 2010).

Tabla 8. Criterios de ponderación

VALOR	IMPORTANCIA
1	Mucho menos importante
2	Menos importante
3	Igual de importante
4	Importante
5	Más importante

Fuente: (Díaz, Álvarez, Ariza y. Barreto, 2010).

Teniendo en cuenta las dos tablas anteriores se determina la importancia de cada uno de los objetivos de primer nivel, para así poder calcular el peso ponderado correspondiente con los valores que se mostraron anteriormente. El procedimiento que se seguirá para determinar dichos valores, es comparar cada objetivo consigo mismo, dándole una calificación acorde con la importancia que presente entre los demás y usando los valores estipulados en la tabla 3, tal como se evidencia en la tabla 9 (Díaz, Álvarez, Ariza y. Barreto, 2010).

Tabla 9. Comparación de los objetivos de primer nivel y determinación del peso ponderado de cada uno de ellos

OBJETIVOS GENERALES						
FACTORES PARA EVALUAR	1. COSTOS	2. DISEÑO	3. PROGRAMACIÓN	4. MEDIOAMBIENTE	TOTAL (FILA)	PESO
1. COSTOS	4	4	3	3	14	39,070%
2. DISEÑO	0,25	3	4	3	10,25	28,605%
3. PROGRAMACIÓN	0,333333333	0,25	4	3	7,583333333	21,163%
4. MEDIO AMBIENTE	0,333333333	0,333333333	0,333333333	3	4	11,163%
TOTAL					35,83333333	100%

Este procedimiento es aplicado, a su vez, para determinar el peso de cada uno de los objetivos de segundo nivel, los cuales serán los que finalmente definan las alternativas con mayor peso para los requerimientos de diseño. Dicho procedimiento se muestra en las tablas 10 a la 13 (Díaz, Álvarez, Ariza y. Barreto, 2010).

Tabla 10. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de costos

1. COSTOS					
CRITERIOS	1.1	1.2	TOTAL (FILA)	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
1.1	3	4	7	62,222%	24,310%
1.2	0,25	4	4,25	37,778%	14,760%
TOTAL			11,25	100%	39,070%

Tabla 11. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de diseño

2. DISEÑO						
CRITERIOS	2.1	2.2	2.3	TOTAL (FILA)	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
2.1	4	3	3	10	47,619%	13,621%
2.2	0,3333333	3	3	6,333333333	30,159%	8,627%
2.3	0,3333333	0,333333333	4	4,666666667	22,222%	6,357%
TOTAL				21	100%	28,605%

Tabla 12. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de programación

3. PROGRAMACIÓN						
CRITERIOS	3.1	3.2	3.3	TOTAL (FILA)	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
3.1	5	4	5	14	52,434%	11,097%
3.2	0,25	4	4	8,25	30,899%	6,539%
3.3	0,2	0,25	4	4,45	16,667%	3,527%
TOTAL				26,7	100%	21,163%

Tabla 13. Comparación y determinación de los pesos ponderados para los objetivos de medio ambiente

4. MEDIO AMBIENTE					
CRITERIOS	1.1	1.2	TOTAL (FILA)	PESO RELATIVO	PESO ABSOLUTO
1.1	4	4	8	65,306%	7,290%
1.2	0,25	4	4,25	34,694%	3,873%
TOTAL			12,25	100%	11,163%

Con la parte anterior completa, se procede a generar una lista en la cual los objetivos de segundo nivel se convierten en las necesidades con las cuales serán juzgadas cada una de las opciones evaluadas y, de esta forma, poder determinar cuál de ellas es la más indicada, como se muestra en la tabla 14 (Díaz, Álvarez, Ariza y Barreto, 2010).

Tabla 14. Evaluación de cada propuesta con los requerimientos del diseño

CATEGORIAS	OBJETIVO	GRADO DE IMPOR-TANCIA	ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3	
			APRECIACIÓN	PONDERACIÓN	APRECIACIÓN	PONDERACIÓN	APRECIACIÓN	PONDERACIÓN
1. COSTOS	1.1 Bajos costo de inversión	24%	4	0,97	4	0,97	3	0,729
	1.2 Bajo costo de recambio de componentes	15%	4	0,59	4	0,59	4	0,590
2. DISEÑO	2.1 Menor cantidad de componentes	14%	2	0,27	4	0,54	4	0,545
	2.2 Utilización de componentes estándar	9%	5	0,43	5	0,43	5	0,431
	2.3 Componentes con conectividad PLUG AND PLAY	6%	3	0,19	3	0,19	4	0,254
3. PROGRAMACIÓN	3.1 Estabilidad en los datos obtenidos	11%	2	0,22	2	0,22	4	0,444
	3.2 Librerías disponibles para implementación	7%	3	0,20	3	0,20	3	0,196
	3.3 Interfaz de acceso remoto	4%	1	0,04	1	0,04	5	0,176
4. MEDIOAMBIENTE	4.1 Bajo consumo energético	7%	4	0,29	4	0,29	4	0,292
	4.2 Componentes reutilizables	4%	4	0,15	4	0,15	4	0,155
TOTAL		100%	3,357		3,630		3,813	

Al observar los resultados obtenidos en la tabla, se puede concluir que de los 3 microcontroladores el RASPBERRY (alternativa 3) sobresale del resto, debido a su capacidad de ser controlado a distancia. Esto le permite hacer modificaciones a la programación del dispositivo sin necesidad de desmontar la unidad, disminuye de forma significativa el tiempo de puesta a punto.

Adicionalmente, también se puede apreciar que los datos obtenidos a través de este dispositivo son más estables que los obtenidos a partir de las versiones de ARDUINO.

Con base en lo anterior, se opta por implementar el RASPBERRY como el microcontrolador para el desarrollo de la versión final del sensor de torque.

7.3 DISEÑO MEDIANTE HERRAMIENTA CAD 3D

Teniendo todas las medias requeridas, se procederá a la creación del prototipo en software SOLIDWORKS®, como se muestra a continuación:

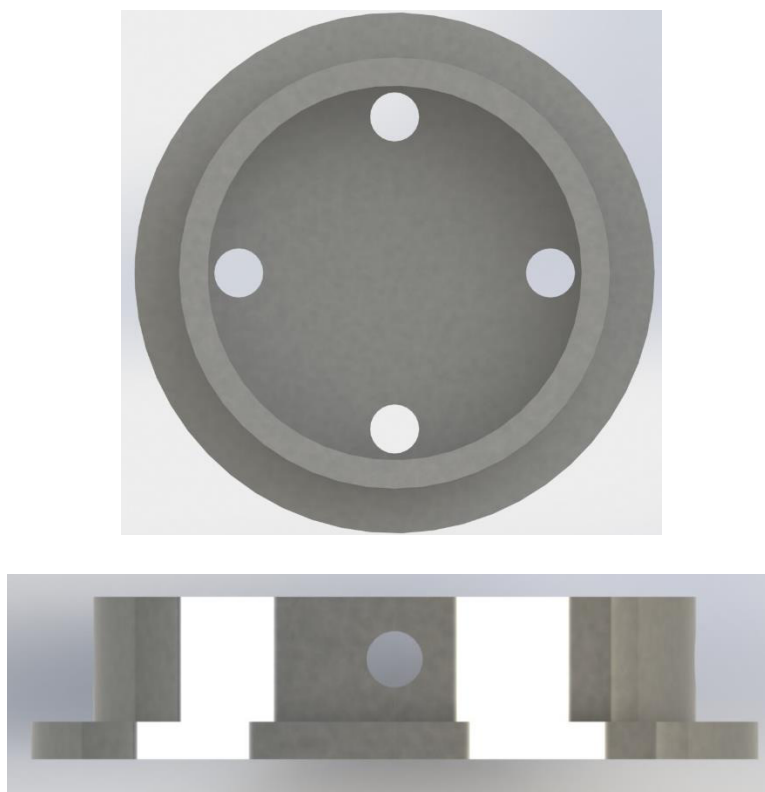
Primero se realiza la parametrización del tubo de aluminio que se utilizará como eje central del transductor. Las medidas de este elemento se obtienen a partir de la muestra física que se consiguió en el mercado local, además se le realizan perforaciones con diámetro de 4 mm, para sujetar al adaptador del eje, como se puede observar en la figura 10.

Figura 10. Imagen Renderizada de la vista superior del tubo central del dispositivo



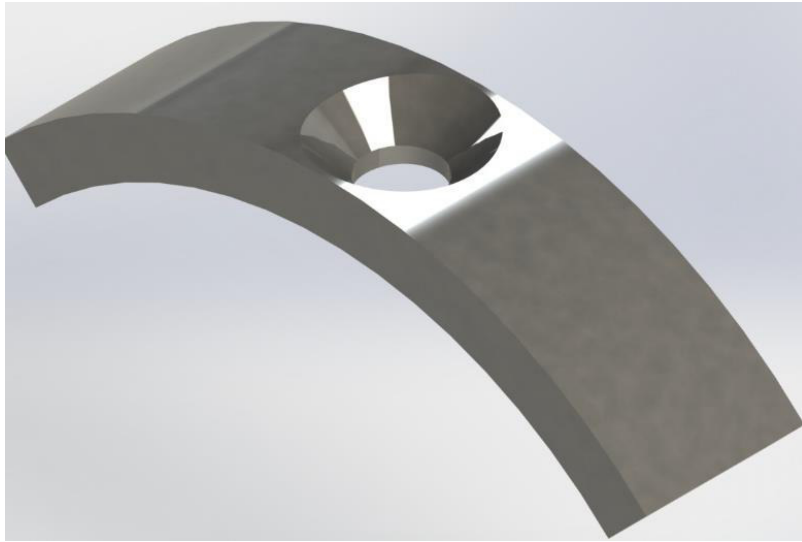
Con el tubo central parametrizado, se procede a elaborar las tapas laterales sobre las cuales descansará la pieza anteriormente mencionada. Para ello, se realiza un borde con una altura de 10 mm en el cual se encuentran las perforaciones de sujeción para el eje con diámetro de 4 mm y, en la placa de respaldo, se hacen 4 perforaciones de 5 mm para realizar el acople del adaptador del eje de la máquina, como se observa en la figura 11.

Figura 11. Imagen renderizada de la vista superior y lateral de las tapas laterales del dispositivo



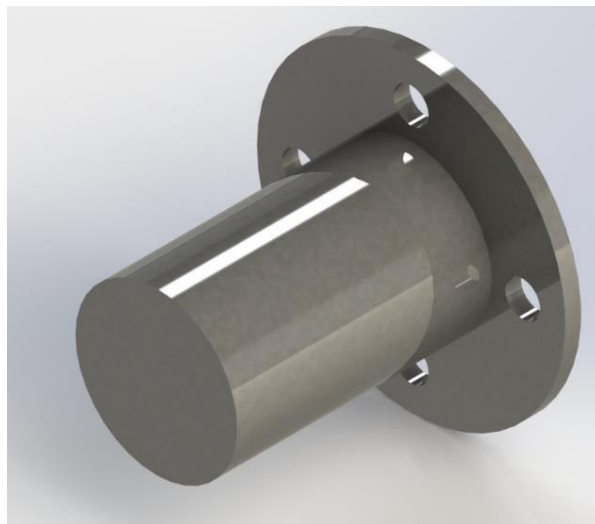
Para garantizar que el eje tubular no rote libremente sobre el soporte, se crearon unas chapetas, con perforación de 4 mm, con chaflán interno, para distribuir uniformemente la presión ejercida por los pernos, como se puede observar en la figura 12.

Figura 12. Imagen renderizada de la vista isométrica de las chapetas



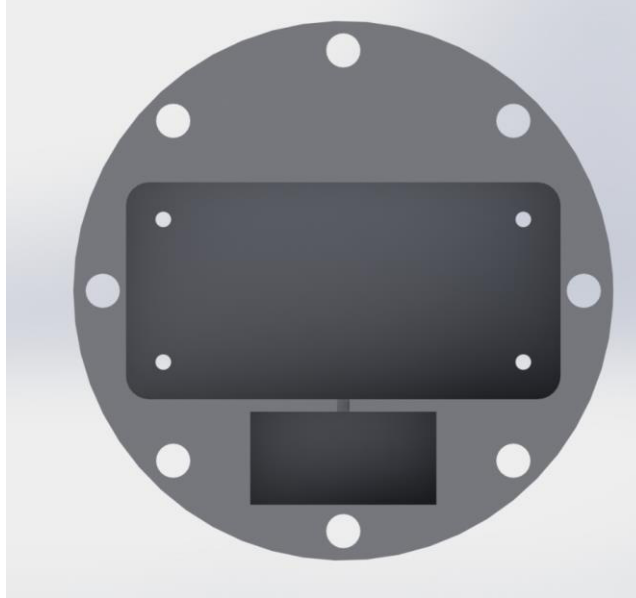
Para acoplar el dispositivo a las maquinas rotativas, por medio de acoples convencionales, se optó por diseñar un adaptador para eje de 1 pulgada de diámetro, el cual cuenta con 4 perforaciones de 5 mm para atornillar el soporte del eje tubular, como se observa en la figura 13.

Figura 13. Imagen renderizada de la vista isométrica del acople



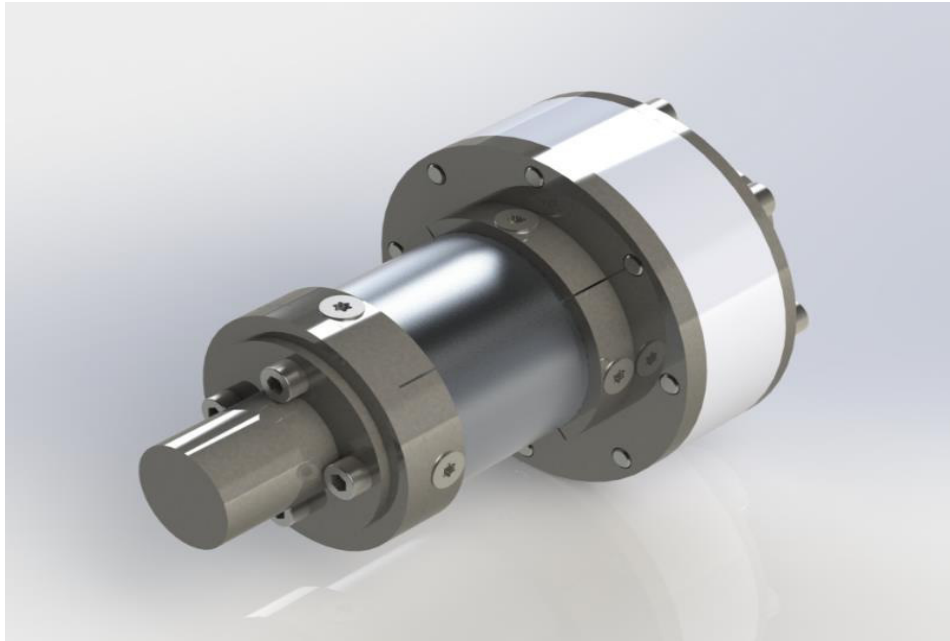
Para lograr que las conexiones inalámbricas del microcontrolador sean posibles, fue necesario diseñar un compartimiento, fabricado en material plástico, para evitar que se presente el efecto de la jaula de Faraday, como se puede observar en la figura 14.

Figura 14. Imagen renderizada de la vista frontal del soporte RASPBERRY



Con todas las piezas del transductor parametrizadas se realiza un ensamble total del dispositivo, como se observa en la figura 15.

Figura 15. Imagen renderizada de la vista isométrica del dispositivo



Las medidas y tolerancias para la fabricación del dispositivo, se encuentran en los planos de detalle que están en los anexos del documento.

7.4 MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

7.4.1 Modelo matemático

Una vez definidas las dimensiones bajo las cuales se va a trabajar el diseño del eje tubular, se procede a calcular los esfuerzos a los cuales se encontrará sometido el elemento durante su operación, para ello se tendrán en cuenta las condiciones de operación que se mencionan en el capítulo 8.1.

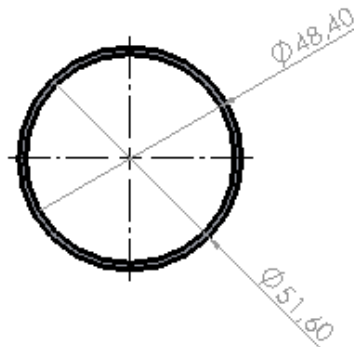
Para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones, se tomarán como parámetros de referencia los consignados en la ficha técnica del material, guardada en la base de datos de Solidworks®, como se puede observar en la tabla 15.

Tabla 15. Propiedades mecánicas del aluminio 6061 T6

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
MODULO ELASTICO	69000	N/mm ²
COEFICIENTE DE POISSON	0,33	N/A
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	310	N/mm ²
LIMITE DE FLUENCIA	275	N/mm ²
DENSIDAD	2700	kg/m ³

Adicionalmente, se utilizará como parámetro inicial la sección transversal del eje tubular, como se puede observar en la figura 16.

Figura 16. Corte de sección del tubo central



Para realizar la estimación teórica de los esfuerzos a los cuales se encontrará sometido el elemento, se aplicarán los modelos matemáticos de esfuerzo máximo y esfuerzo cortante promedio.

7.4.2 Modelos del esfuerzo cortante máximo

Para calcular el modelo de esfuerzo cortante máximo, se aplican las ecuaciones 1 y 2, que generan los siguientes resultados:

$$J = \frac{\pi}{32} (d_2^4 - d_1^4) \rightarrow J = \frac{\pi}{32} (51.6^4 - 48.4^4) \text{ mm}^4 \rightarrow J = 157240.482 \text{ mm}^4$$

$$\tau_{XY} = \frac{Tc}{J} \rightarrow \tau_{XY} = \frac{30000 \text{ Nmm} * \frac{51.6 \text{ mm}}{2}}{157240.482 \text{ mm}^4} \rightarrow \tau_{XY} = 4.919 \text{ MPa}$$

Una vez obtenido el esfuerzo cortante máximo, se plantea el círculo de Morh para identificar la orientación principal a la cual se encuentra sometido el elemento diferencial, como se puede observar en las figuras 17 y 18.

Figura 17. Circulo de Morh del modelo de cortante máximo

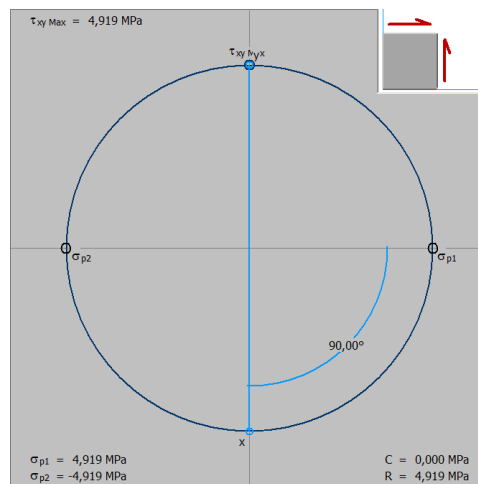
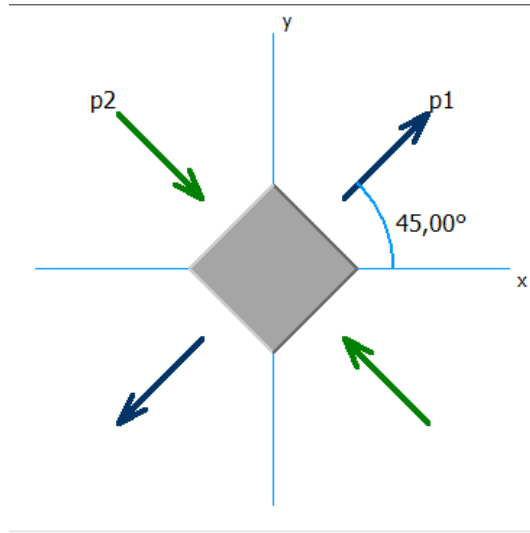


Figura 18. Estado del elemento diferencial para el modelo de esfuerzo máximo



Teniendo en cuenta el comportamiento mostrado por el círculo de Morh, del elemento diferencial se puede observar que éste se encuentra sometido a tensión compresión, por lo cual para realizar el cálculo de las deformaciones unitarias del elemento, se hace necesaria la aplicación de la ley de Hook en dos dimensiones, de acuerdo con la ecuación 8 se obtiene el siguiente resultado:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \frac{-\nu * \sigma_2}{E} \rightarrow \epsilon_1 = \frac{4.919MPa}{69000 MPa} + \frac{-0.33 * -4.919MPa}{69000 MPa} \rightarrow \epsilon_1 = 0.0000948155$$

El valor obtenido, a partir de las deformaciones unitarias del elemento, es equivalente al valor de la deformación a la cual se encontrarán sometidas las galgas extensiométricas colocadas en ángulo de 45° sobre la superficie del eje tubular.

Una vez se obtienen los valores del esfuerzo cortante máximo al cual se encontrará sometido el eje tubular, se procede a calcular el esfuerzo equivalente de Von Mises para determinar el factor de seguridad del eje, para esto se aplica la ecuación 11.

$$\sigma_{eq}^{VM} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2}$$

Como el elemento se encuentra sometido a cortante puro, los esfuerzos principales en los ejes X, Y son 0. La fórmula es simplificada de la siguiente manera:

$$\sigma_{eq}^{VM} = \sqrt{3 * \tau_{xy}^2} \rightarrow \sigma_{eq}^{VM} = \sqrt{3 * 4.919 MPa^2} \rightarrow \sigma_{eq}^{VM} = 8.519 MPa$$

Con el esfuerzo equivalente obtenido se procede a calcular el factor de seguridad del componente utilizando la ecuación 12 y se obtiene el siguiente resultado:

$$N = \frac{Sy}{\sigma_{eq}} \rightarrow N = \frac{275 MPa}{8.519 MPa} \rightarrow N = 32.27$$

Con base en los datos obtenidos por medio del modelo de cortante máximo, se puede establecer que la aleación de aluminio 6061 T6 no presentará falla bajo las condiciones de trabajo establecidas.

7.4.3 Modelos del esfuerzo cortante promedio

Aplicando el modelo de esfuerzo cortante promedio y empleando las ecuaciones 3 y 4, se obtienen los siguientes resultados:

$$\tau_{prom} = \frac{T}{2t\pi \left(\frac{r + r_i}{2}\right)^2} \rightarrow \frac{30000 Nmm}{2 * 1.6 mm * \pi * \left(\frac{25.8 mm + 24.2 mm}{2}\right)^2} \rightarrow$$

$$\tau_{prom} = 4.774 MPa$$

Una vez obtenido el esfuerzo cortante máximo, se plantea el círculo de Mohr para identificar la orientación principal a la cual se encuentra sometido el elemento diferencial, como se puede observar en las figuras 19 y 20.

Figura 19. Circulo de Morh del modelo de cortante promedio

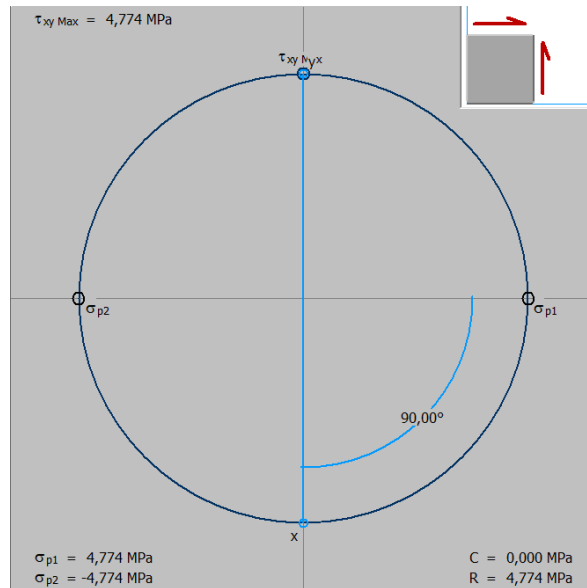
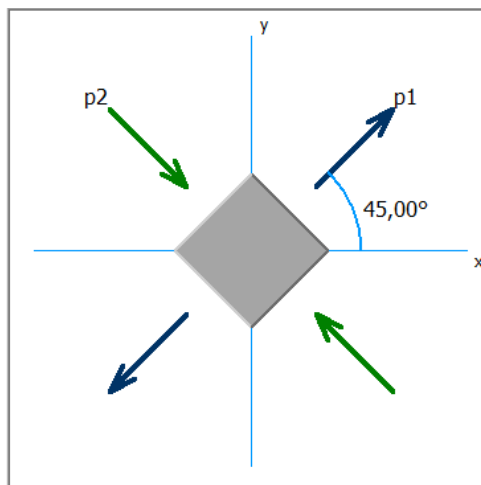


Figura 20. Estado del elemento diferencial para el modelo de esfuerzo promedio



Teniendo en cuenta el comportamiento presentado por el círculo de Morh del elemento diferencial, se puede observar que este se encuentra sometido a tensión compresión, por lo cual para realizar el cálculo de las deformaciones unitarias del elemento, se hace necesaria la aplicación de la ley de Hook en dos dimensiones, aplicando la ecuación 8 se obtienen el siguiente resultado:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \frac{-\nu * \sigma_2}{E} \rightarrow \epsilon_1 = \frac{4.774 MPa}{69000 MPa} + \frac{-0.33 * -4.774 MPa}{69000 MPa} \rightarrow \epsilon_1 = 0.000092020$$

El valor obtenido, a partir de las deformaciones unitarias del elemento, es equivalente al valor de la deformación a la cual se encontrarán sometidas las galgas extensiométricas colocadas en ángulo de 45° sobre la superficie del eje tubular.

Una vez se obtienen los valores del esfuerzo cortante promedio al cual se encontrará sometido el eje tubular, se procede a calcular el esfuerzo equivalente de Von Mises aplicando la ecuación 11, se obtiene el siguiente resultado:

$$\sigma_{eq}^{VM} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2}$$

Como el elemento se encuentra sometido a cortante puro, los esfuerzos principales en los ejes X, Y son 0. La fórmula es simplificada de la siguiente manera:

$$\sigma_{eq}^{VM} = \sqrt{3 * \tau_{xy}^2} \rightarrow \sigma_{eq}^{VM} = \sqrt{3 * 4.774 MPa^2} \rightarrow \sigma_{eq}^{VM} = 8.268 MPa$$

Con el esfuerzo equivalente obtenido, se procede a calcular el factor de seguridad del componente aplicando la ecuación 12, se obtiene el siguiente resultado:

$$N = \frac{Sy}{\sigma_{eq}} \rightarrow N = \frac{275 MPa}{8.268 MPa} \rightarrow N = 33.26$$

Con base en los datos obtenidos por medio del modelo de cortante promedio, se puede establecer que la aleación de aluminio 6061 T6 no presentará falla bajo las condiciones de trabajo establecidas.

Los resultados obtenidos, de los modelos de cortante máximo y cortante promedio, se utilizarán como los parámetros de comparación para la simulación por elementos finitos del eje tubular.

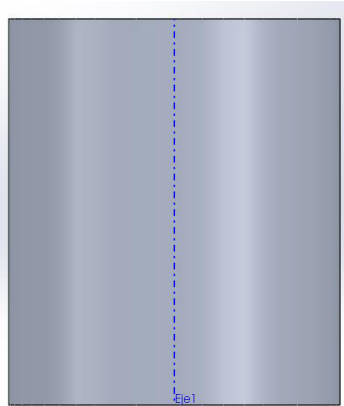
7.5 SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Una vez terminado el diseño conceptual y los modelos matemáticos del eje tubular, es necesario someterlos a pruebas mediante el uso de herramientas computacionales, con el fin de determinar, con mayor precisión, el comportamiento del elemento que será sometido a las condiciones de trabajo que se explican en el capítulo 8.1. Para ello se empleará la herramienta de simulación por elementos finitos SOLIDWORKS SIMULATION ® y el siguiente procedimiento:

- 1) Simplificación de la geometría y creación del eje central del tubo. Se eliminan las perforaciones en la superficie el tubo y se define un eje concéntrico al eje de rotación del componente, como se puede observar en la figura 21.

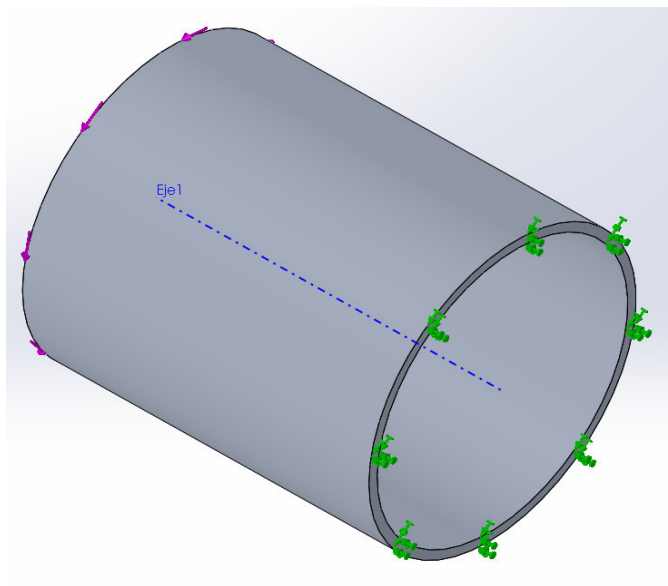
Figura 21. Simplificación del tubo central y colocación de eje medio





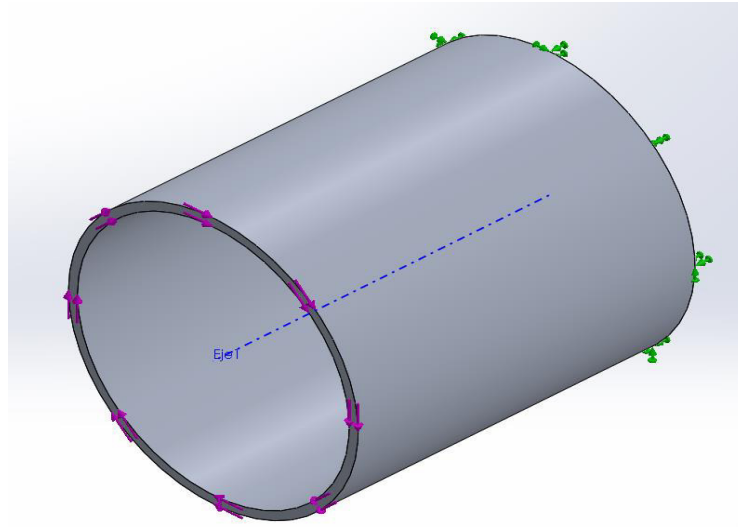
- 2) Restricciones. Se restringe la cara posterior del elemento, con el fin de eliminar todos los grados de libertad, como se observa en la figura 22.

Figura 22. Definición de restricciones geométricas del tubo central



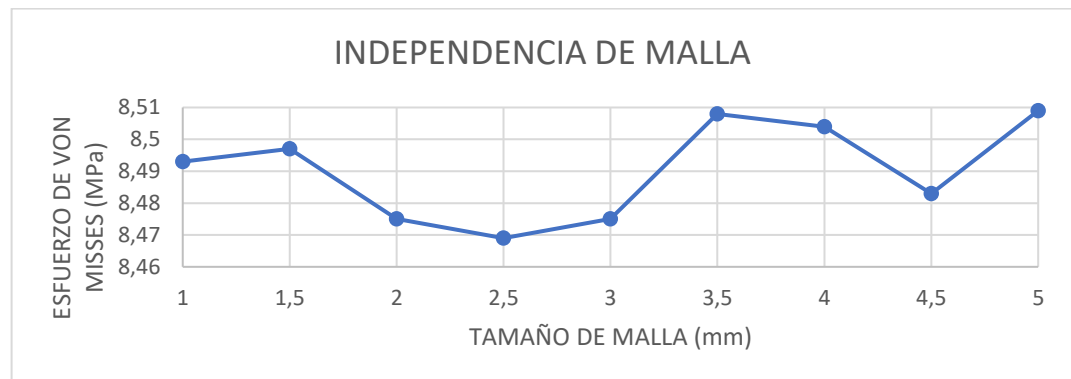
- 3) Cargas. En la cara frontal del elemento se coloca una carga rotacional de 30 N.m, la cual gira en sentido horario sobre el eje de rotación previamente definido, como se observa en la figura 23.

Figura 23. Definición de carga torsional de 30 Nm.



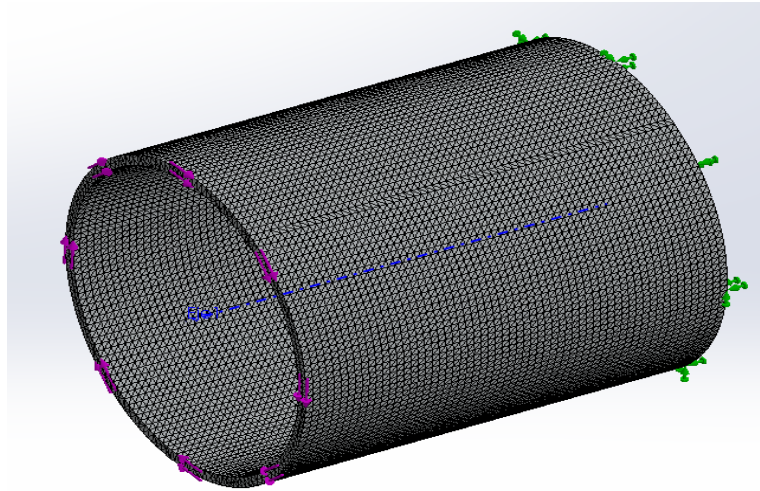
- 4) Mallado. Se procede a realizar un estudio de independencia de mallado, que permita definir cuál es el tamaño del elemento diferencial más apropiado para la simulación, tal como se observa en la figura 24.

Figura 24. Comportamiento de la independencia del mallado del tubo central



Al observar el comportamiento obtenido del esfuerzo equivalente de Von Mises, en los diferentes tamaños de malla, se puede observar que la menor variación se obtiene en el rango de 1 a 1.5 mm, por lo cual se utilizará un mallado de 1 mm, como se aprecia en la figura 25.

Figura 25. Mallado del tubo central con dimensiones de elementos de 1 mm.



Completados los pasos anteriores, se procede a darle solución al modelo para determinar los esfuerzos y deformaciones unitarias a las cuales se encuentra sometido. Al mismo tiempo, se calcula el factor de seguridad de diseño del eje tubular, como se observa en las figuras 26 a la 28.

Figura 26. Distribución de esfuerzos de Von Misses

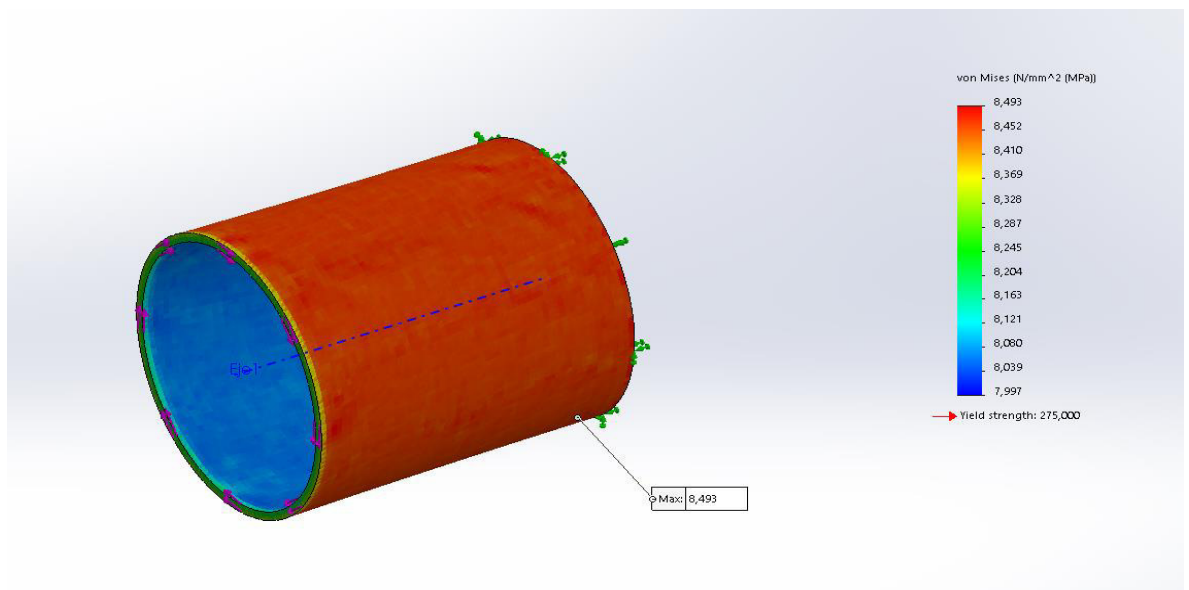


Figura 27. Distribución de deformaciones unitarias

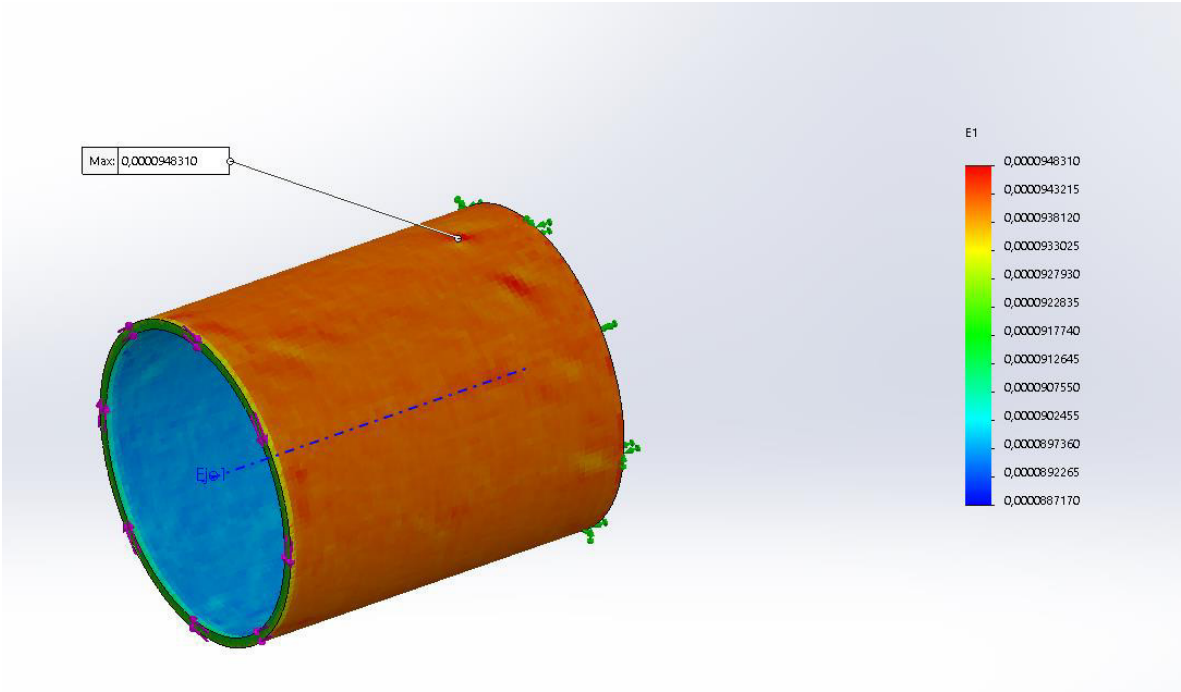
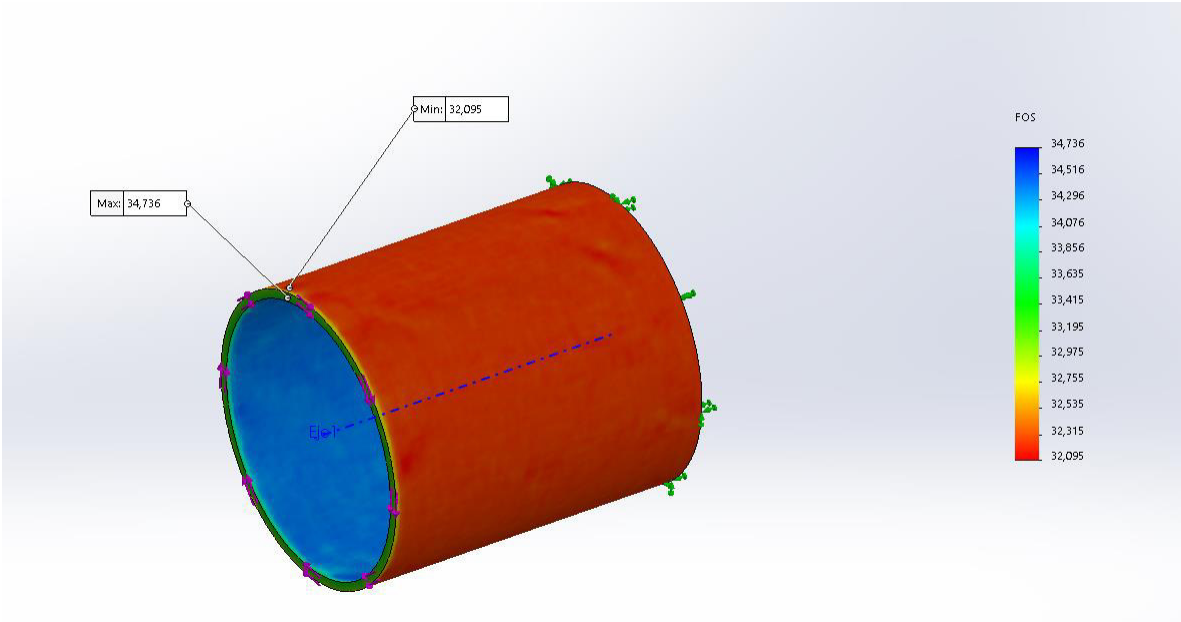


Figura 28. Distribución de factor de seguridad



Analizando los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos para un torque de 30 Nm, se pudo observar que el esfuerzo máximo al cual se encuentra sometido el eje tubular es de 8.493 MPa, el cual se encuentra localizado en la pared externa de la tubería.

Las deformaciones unitarias sobre la superficie del eje poseen un valor máximo de 0.0000948310 y valor promedio de 0.0000941320, las deformaciones unitarias máximas se encuentran localizadas en la pared externa de la tubería.

El factor de seguridad mínimo para el eje tubular sometido a un torque de 30 Nm es de 32.

7.6 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DEL MODELO MATEMÁTICO Y MODELO COMPUTACIONAL

Con los resultados obtenidos de los modelos matemáticos de esfuerzos y de la simulación por elementos finitos, se procede a determinar el porcentaje de error de ambos modelos, que deberá ser menor al 5%, con el fin de determinar la validez de la simulación. Para ello se empleará la siguiente ecuación:

$$ERROR\% = \left(\frac{VALOR\ TEORICO - VALOR\ COMPUTACIONAL}{VALOR\ TEORICO} \right) * 100\% \leq 5\%$$

Aplicando la formula anteriormente planteada se obtienen los resultados representados en la tabla 16:

Tabla 16. Porcentaje de error de los resultados del modelo teórico vs computacional

MODELO DE CORTANTE MAXIMO			
MODELO	VALOR TEÓRICO	VALOR COMPUTACIONAL	ERROR %
VON MISES	8,519	8,493	0,31%
FACTOR DE SEGURIDAD	32,27	32,095	0,54%
DEFORMACION UNITARIA	0,00009481	0,00009483	0,02%

MODELO DE CORTANTE PROMEDIO			
MODELO	VALOR TEÓRICO	VALOR COMPUTACIONAL	ERROR %
VON MISES	8,268	8,493	2,72%
FACTOR DE SEGURIDAD	33,26	32,095	3,50%
DEFORMACION UNITARIA	0,00009202	0,00009483	3,05%

Al analizar los resultados obtenidos en tabla 11, se puede apreciar que ambos modelos validan los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos, pero el modelo bajo el cual está regido el análisis computacional es modelo de cortante máximo.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se confirma, mediante los resultados de la simulación, que el diseño y aleación seleccionadas para la fabricación del eje tubular son óptimas para las condiciones de trabajo.

7.7 SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE FRECUENCIAS RESONANTES

Una vez completadas las simulaciones de esfuerzos sobre el eje principal, se optó por determinar, mediante simulación por elementos finitos, las frecuencias resonantes del dispositivo, para esta simulación se sometió el dispositivo a las siguientes condiciones:

- Velocidad de rotación: 3600 RPM o 60 Hz.
- Tipo de contactos entre elementos rígidos.
- Extremos del dispositivo posicionados sobre rodamientos radiales.

Este estudio será realizado con SOLIDWORKS SIMULATION ® y su herramienta de análisis de frecuencias resonantes, para lo cual se empleó el procedimiento mostrado a continuación:

- 1) Ensamble del dispositivo completo y definición de contactos. Una vez realizado el ensamble de los diferentes componentes, se realizó la definición de los tipos de contactos entre los diferentes elementos del dispositivo, tal como observa en las figuras 29 y 30.

Figura 29. Vista isométrica del dispositivo

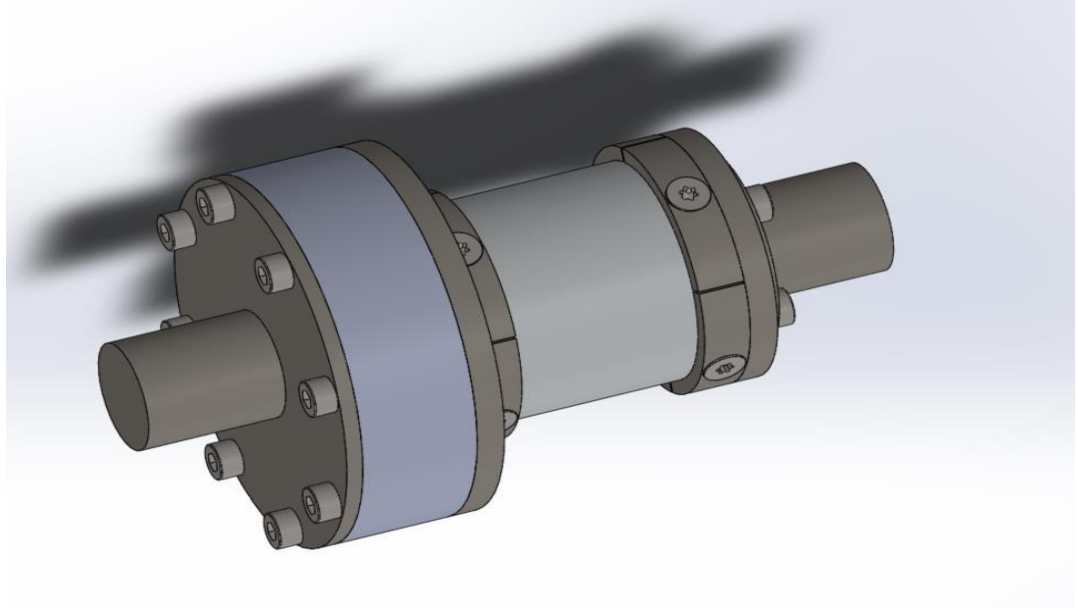
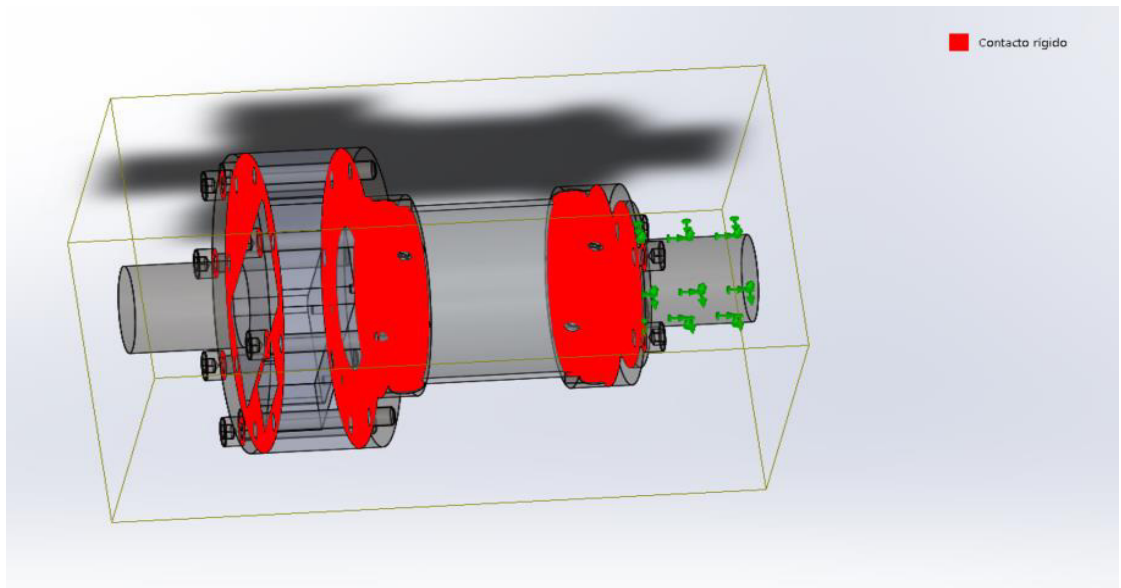
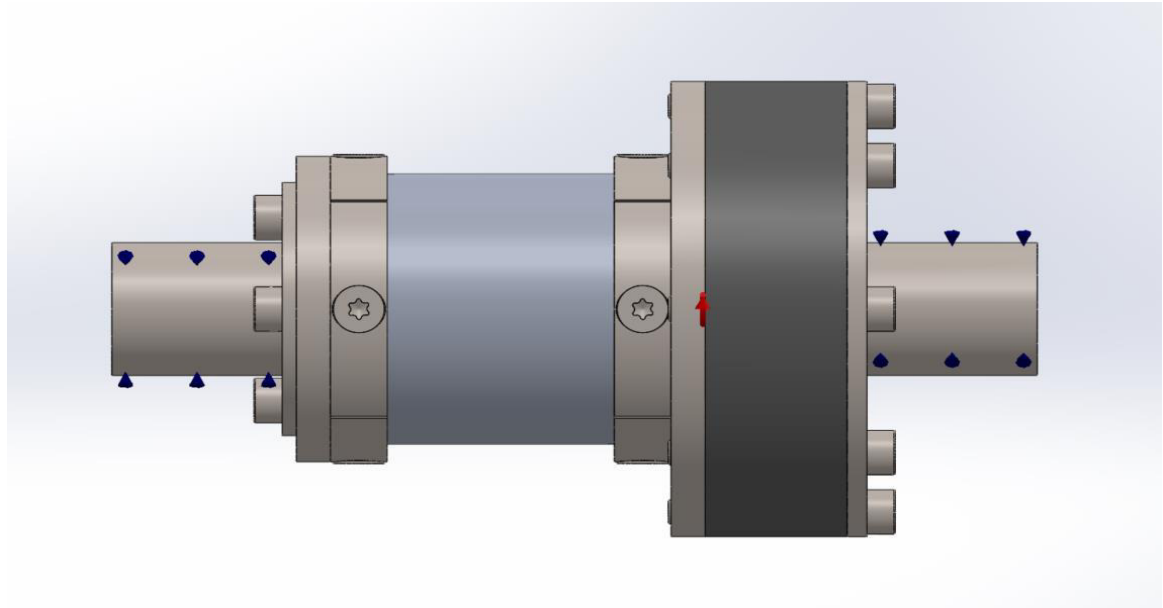


Figura 30. Definición de contactos entre elementos del ensamble



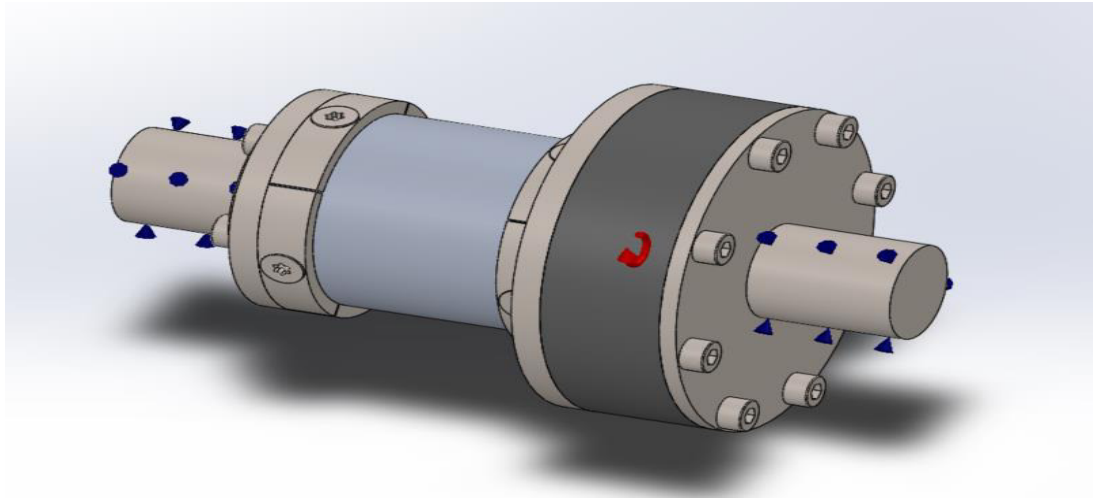
- 2) Restricciones. Se restringen los extremos de los ejes empleando restricciones de tipo rodamiento radiales rígidos, estos son representados por los conos de color azul. Como se puede observar en la figura 31:

Figura 31. Definición de restricciones tipo rodamiento radiales rígidos



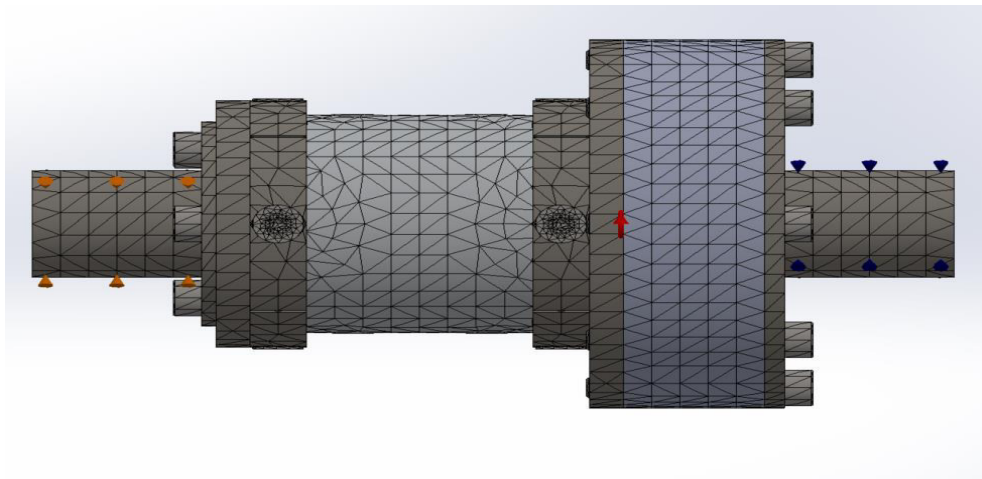
- 3) Carga rotativa. Teniendo en cuenta que el modelo se encuentra girando a una velocidad aproximada de 3600 RPM o 60 Hz, se coloca una carga externa tipo centrífuga, esta se encuentra representada por una flecha de color rojo. Como se puede observar en la figura 32.

Figura 32. Definición de la carga de velocidad rotacional



- 4) Mallado. Como este modelo es un ensamble de varios componentes, se optó por emplear una malla con dimensión de elemento de 5 milímetros con refinamiento en los tornillos, para disminuir el tiempo de simulación. Como se puede observar en la figura 33.

Figura 33. Mallado con dimensión de elemento de 5 mm y refinamiento de malla en los tornillos



Con los pasos anteriores completados, se procede a darle solución al modelo para determinar las diferentes frecuencias a las cuales puede resonar el dispositivo, como se observa en las figuras 34 a la 36.

Figura 34. Distribución de amplitudes promedio modelo 1

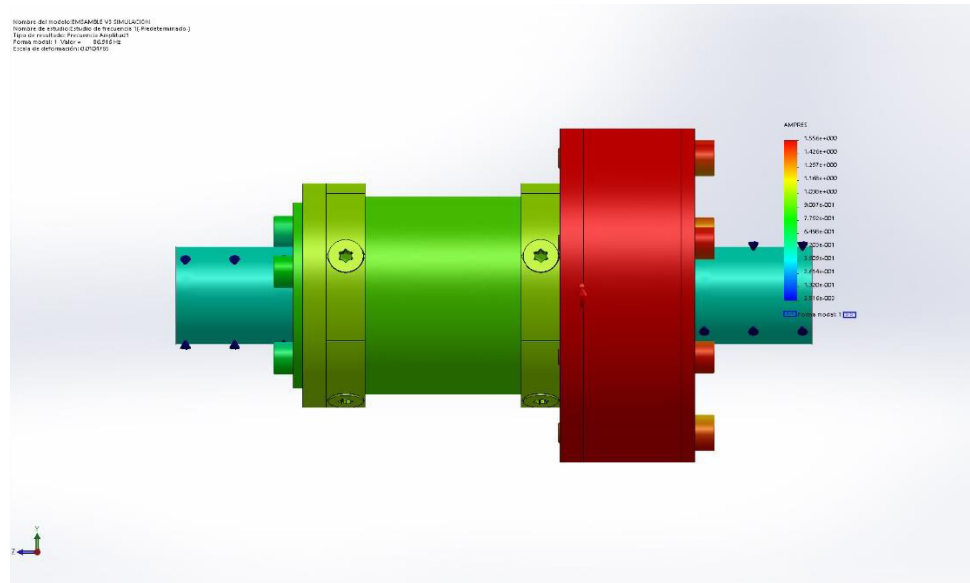


Figura 35. Distribución de amplitudes promedio modelo 2

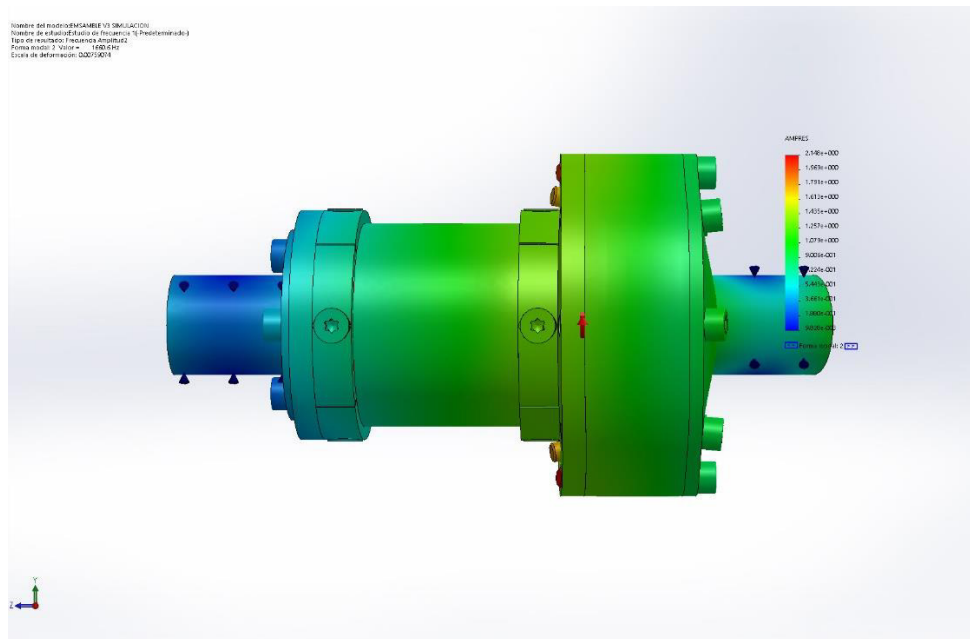
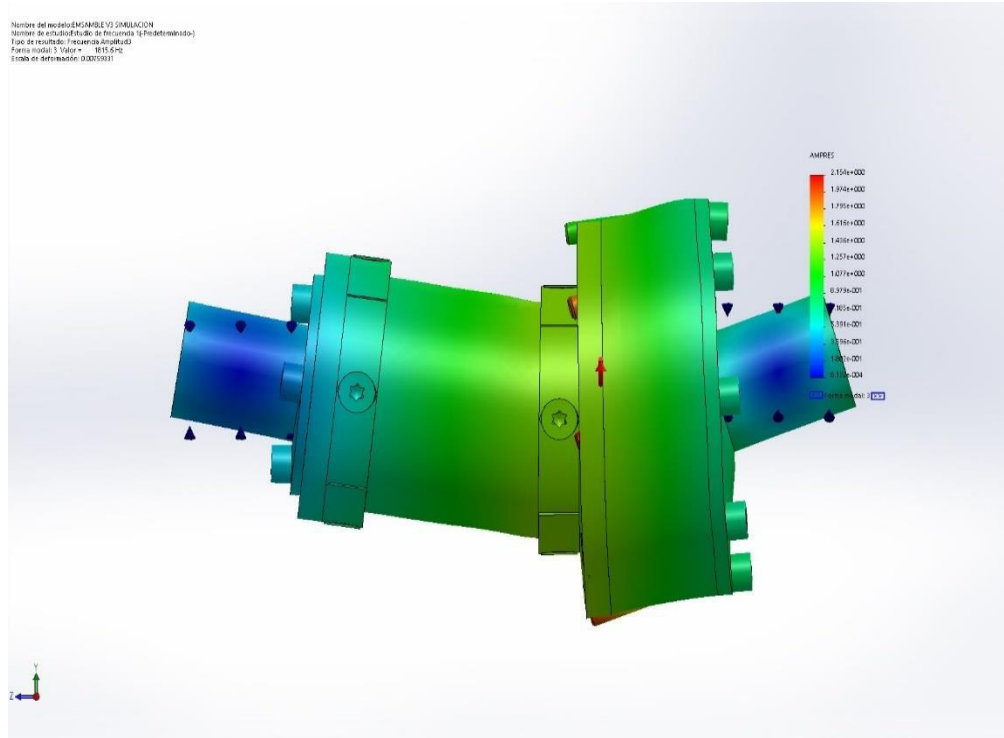


Figura 36. Distribución de amplitudes promedio modelo 3



Empleando los datos obtenidos de las simulaciones se obtienen los resultados mostrados en la tabla 17.

Tabla 17. Frecuencia de resonancia *del dispositivo* a una velocidad de rotación de 3600 RP

FRECUENCIA RESONANTE	
FRECUENCIA	VALOR (Hz)
MODELO 1	86,91
MODELO 2	1660,6
MODELO 3	1815,6

Analizando los resultados obtenidos de los diferentes modos de vibración, se puede observar que el dispositivo no resuena con la frecuencia de rotación de los motores eléctricos.

7.8 DESARROLLO DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN E INTERFAZ GRAFICAS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

Teniendo en cuenta que el RASPBERRY PI fue seleccionado como el microcontrolador para realizar la función de “data logger”, fue necesaria la creación de un programa en Python que permita la comunicación entre los diferentes componentes electrónicos.

Para ello se empleó como sistema operativo el RASBIAN STRECH con interfaz gráfica, al cual posteriormente se le instalaron las siguientes librerías y programas auxiliares:

- Python 3.4 IDE.
- GPIO.
- SCALE.
- SOCKET.

Con el RASPBERRY PI, completamente operativo, se realiza la programación de la primera versión del software de comunicación con el conversor análogo digital HX 711, como se puede observar en la figura 37.

Figura 37. Programa en PYTHON para la recolección de datos del HX 711 mediante línea de comando local

```
#!/usr/bin/python3
# Librerías requeridas para interacción HX 711 con RASPBERRY PI
import sys
import RPi.GPIO as GPIO
import time
from scale import Scale
#Iniciar recolección de datos del HX 711
scale= Scale()
scale.setReferenceUnit(-1000)

while True:

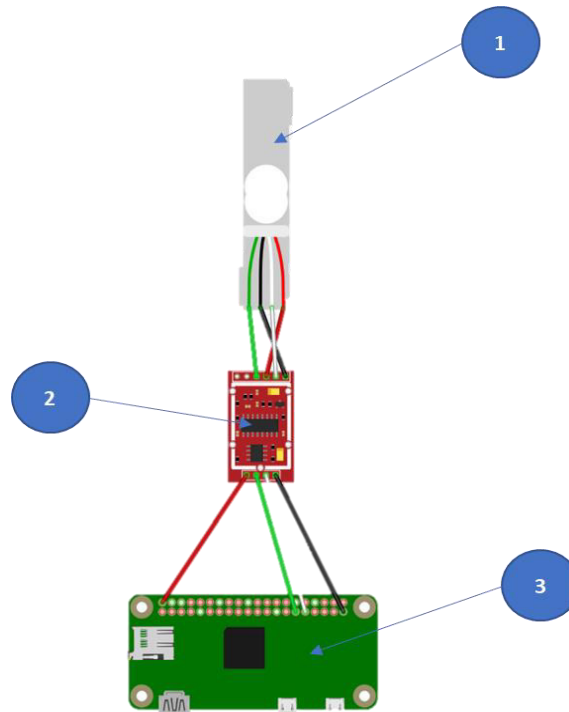
    try:
        ta=scale.getMeasure()
        print ("{0: 4.4f}".format(ta))

    except:
        GPIO.cleanup()
        break
```

Esta versión de prueba del programa consiste en la iniciación de la comunicación del RASPBERRY con el HX 711, mediante los puertos GPIO. Para iniciar la comunicación entre ambos dispositivos, fue necesario emplear la librería SCALE, la cual permite realizar la conversión de los bits obtenidos en el convertidor análogo digital a valores numéricos. Adicionalmente, esta librería facilita la calibración de la unidad de medida del dispositivo, mediante el comando `scale.setReferenceUnit`.

Para comprobar que el RASPBERRY PI recibía los datos enviados desde el HX 711 se realizó el montaje observado en la figura 38.

Figura 38. Diagrama de montaje de los diferentes componentes electrónicos

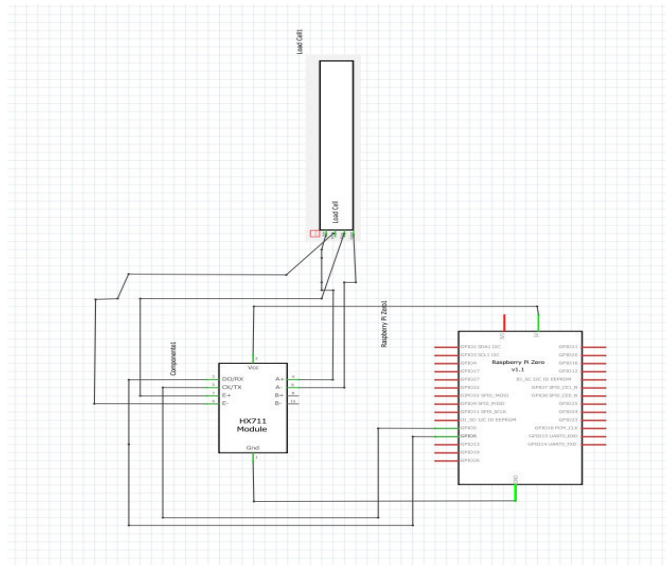


El montaje consta de los siguientes elementos:

- 1) Celda de carga de 1 Kg con puente Wheatstone completo.
- 2) Conversor-análogo digital HX 711.
- 3) Raspberry Pi cero W.

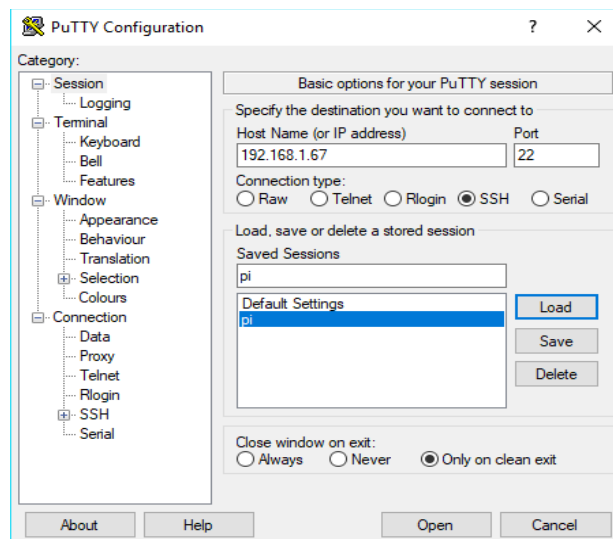
La conexión de los componentes fue realizada de acuerdo con el diagrama que se puede observar en la figura 39.

Figura 39. Diagrama de conexión electrónica de HX 711 al RASPBERRY



Una vez realizadas todas las conexiones, se procede a verificar que el microcontrolador haga la conversión de los datos obtenidos de la celda de carga, por medio de la consola de comandos remotos PUTY, en la cual se inserta la dirección IP del dispositivo, como se puede observar en la figura 40.

Figura 40. Interfaz de línea de comandos local mediante software libre PUTY



Mediante esta aplicación se ejecutó el software presentado, obteniéndose los resultados iniciales que se observan en la figura 41.

Figura 41. Lista de valores de prueba recibidos a través del software PUTY

-21.7984	66.7361
-21.7955	72.7978
-21.7937	75.0316
-21.8010	77.2742
-21.8071	79.6346
-21.8101	81.8241
-21.8132	155.4856
-21.8168	156.2341
-21.8208	156.2341
-21.8231	156.2341
-21.8237	156.2341
-21.8370	155.8825
-21.8344	155.5492
-21.8344	154.0963
-21.8360	150.9686
-21.8354	139.4651
-21.8356	120.1541
-21.8366	101.9410
-21.8345	92.9685
-21.8352	70.9653
-21.8311	45.8211
-21.8368	27.7891
-21.8131	23.8151
-21.8144	23.6889
-21.8164	23.5659
-21.3111	23.3394
-19.3552	23.2826
-14.0139	24.2537
-14.0139	25.1516
-7.4422	26.0913
7.8003	31.0589
27.1996	
46.6392	

Estos datos fueron obtenidos mediante la estimulación de la celda de carga y observados en el monitor serial de la consola de comandos, permitiendo ver que la interacción de las librerías empleadas es óptima para la operación del sistema.

Por otro lado, debido a la necesidad de realizar el análisis posterior de los datos, se optó por hacer el envío de estos mediante interfaz remota, para lo cual se empleó la librería SOCKET. Esta librería permite la creación de servidores remotos mediante la aplicación de protocolo TCP/IP.

Para la segunda versión del software se tuvo como base la versión de prueba a la cual se le agregaron los comandos de la librería SOCKET, de este modo se convirtió el RASPBERRY en un servidor con la capacidad de envío de datos numéricos, como se puede observar en la figura 42.

Figura 42. Programa en PYTHON para el envío de datos mediante protocolo TCP/IP

```
#!/usr/bin/python3
import sys
import RPi.GPIO as GPIO
import socket
import time
from scale import Scale
# Establecer conexion con el servidor remoto con ayuda de Labview

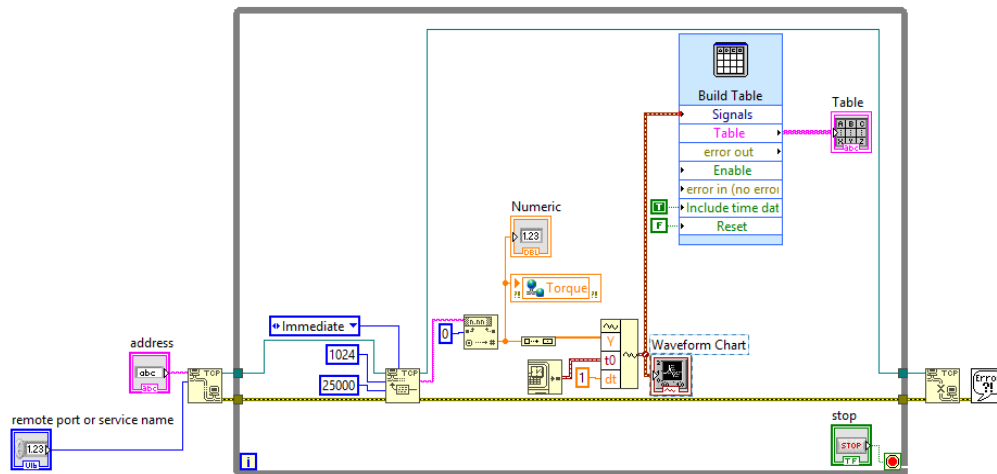
socket_s= socket.socket()
host=''
port= 1557
backlog=5
socket_s.bind ((host, port))
socket_s.listen (backlog)
print ("Esperando una conexion :!")
socket_s, (host, port)=socket_s.accept()
print ("Conexion establecida :)")

# recolectar datos del HX711
scale= Scale()
scale.setReferenceUnit(-1000)
while True:
    try:
        ta=scale.getMeasure()
        if (-100<ta<100):
            t =(scale.getMeasure())
            ts=str(t)
            socket_s.send(str.encode(ts))
    except:
        print ("DESCONECTADO ..... :(")
        socket_s.close()
        GPIO.cleanup()
        break
```

Con la programación del RASPBERRY terminada, fue necesaria la creación de una interfaz que permitiera la conexión, mediante protocolo TCP/IP, y la recolección de datos. Para realizar esta interfaz se optó por emplear el software LABVIEW® en su versión para estudiantes, debido a que nativamente es compatible con el protocolo TCP/IP, lo cual simplifica la creación del módulo de recepción datos.

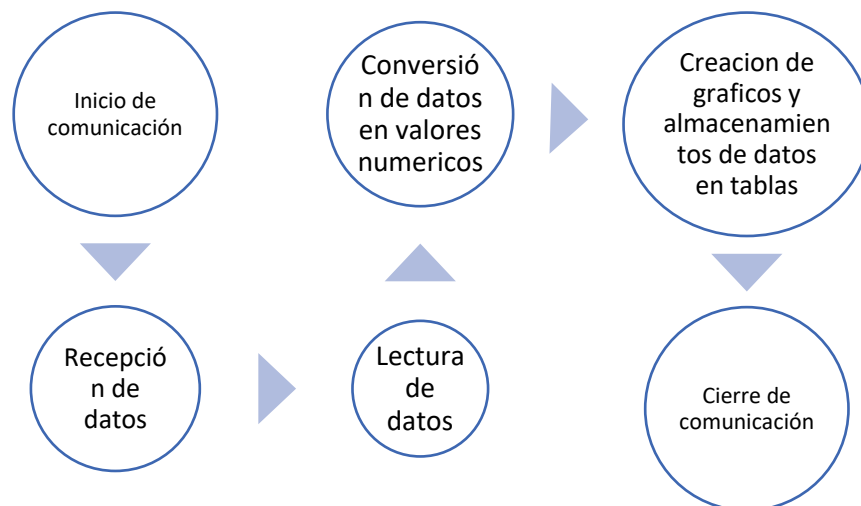
Para la comunicación de datos en el VI se utilizó la herramienta TCP, la cual requiere la dirección IP y número del puerto asociado al servidor que realiza el envío de los datos, el diagrama de bloques se puede ver en la figura 43.

Figura 43. Programa en LABVIEW para la recolección de datos mediante protocolo TCP/IP



El funcionamiento del VI anteriormente presentado en la figura 44.

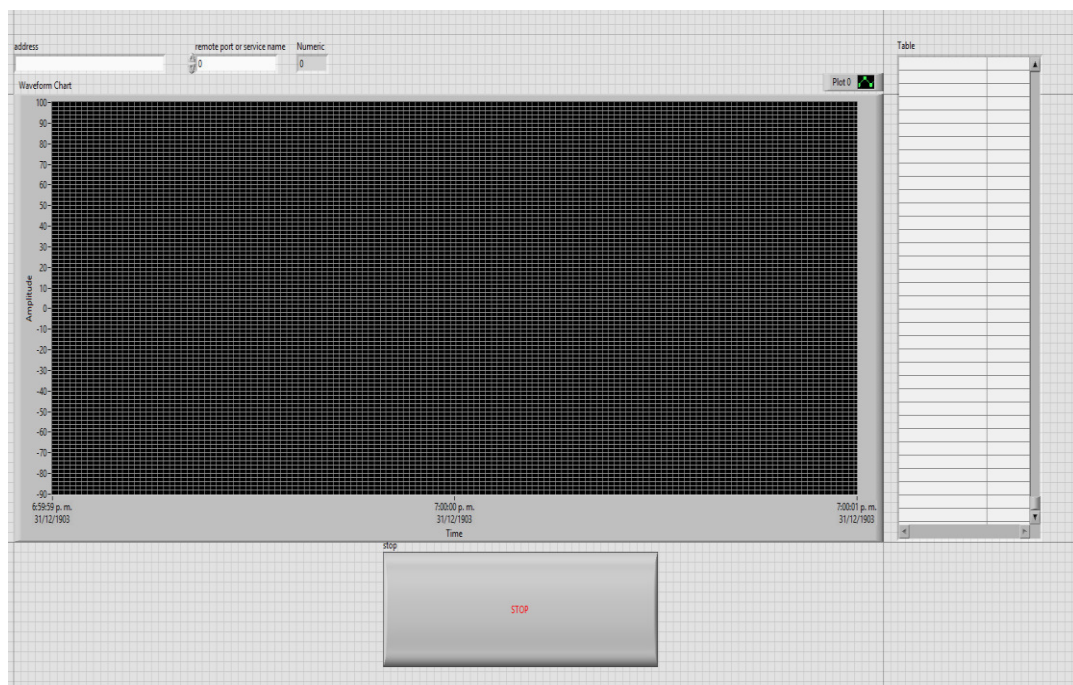
Figura 44. Diagrama de flujo del programa en LABVIEW



Es importante tener en cuenta que, para que ambos programas funcionen simultáneamente, ambos dispositivos deben estar conectados a la misma red de internet. Adicionalmente, el servidor que realiza el envío de los datos debe ser iniciado antes que el servidor que recibe la información y la desconexión deben hacerse de forma inversa. Esto se debe, en gran parte, a que la librería socket exige comprobar que se encuentre conectado un servidor receptor para proseguir con la ejecución del programa en el servidor que realiza el envío.

Con el diagrama de bloque terminado se crea la interfaz gráfica, encargada de realizar la representación gráfica de los datos obtenidos. Como se puede observar en la figura 45.

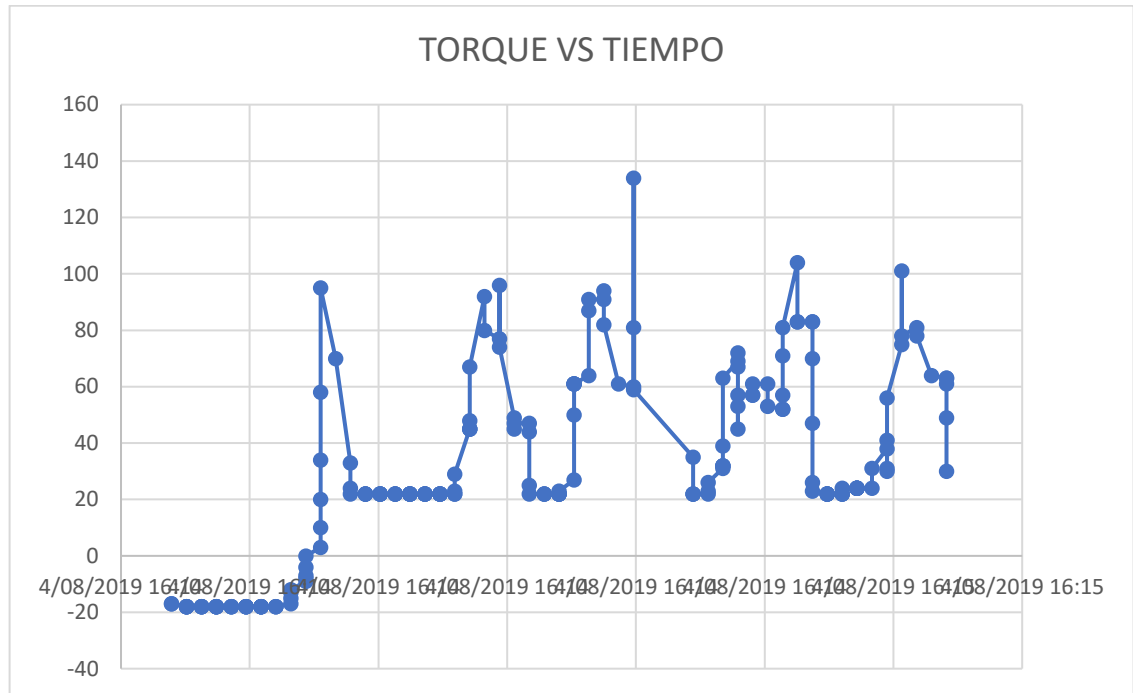
Figura 45. Interfaz en LABVIEW para la recolección de datos



En esta interfaz se deben colocar los datos de IP y REMOTE PORT del servidor que realiza el envío de datos. Una vez terminada la interfaz gráfica, se realiza la prueba de conexión y recepción de datos.

A partir de la prueba anterior, con los datos enviados por el RASPBERRY, se obtiene el gráfico de la figura 46.

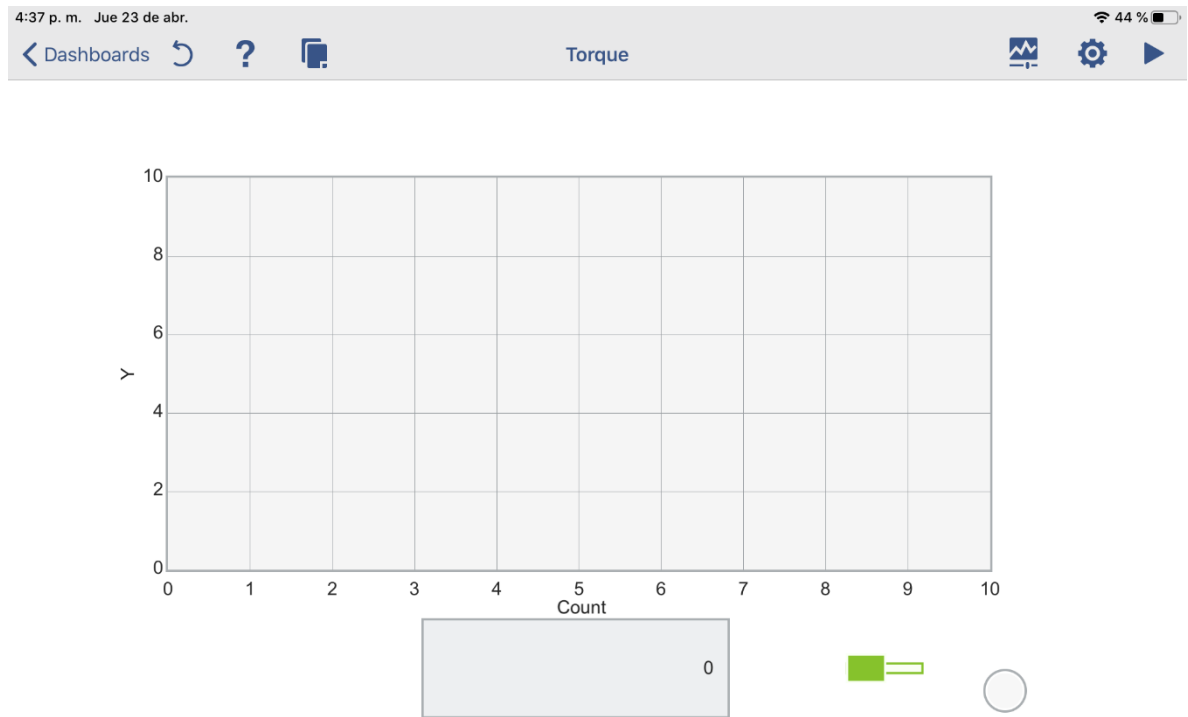
Figura 46. Datos de prueba recibidos en la interfaz de LABVIEW mediante protocolo TCP/IP



Este gráfico permitió validar que la conexión entre ambos dispositivos es estable y que la interfaz gráfica es capaz de representar gráficamente y de almacenar los datos obtenidos en tiempo real.

Adicionalmente, a esta interfaz gráfica se le anexó una opción para el envío de variables a través de la aplicación móvil LABVIEW DASHBOARD ®. Con ello se busca que, el torque obtenido, pueda ser analizado por múltiples dispositivos al mismo tiempo, como se puede observar en la figura 47.

Figura 47. Interfaz de enlace a través de LABVIEW DASHBOARD



También se observó que el mejor desempeño obtenido por el RASPBERRI como datalogger, fue mediante el uso de la consola de comando, esto se debe a que la versión ZERO empleada para este diseño solo cuenta con 512 Mb de memoria RAM y la interfaz gráfica del RASPBIAN genera un uso excesivo de memoria lo cual perjudica de manera significativa la velocidad de procesamiento de datos.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos del modelos matemático y computacional permitieron determinar los esfuerzos y el factor de seguridad del eje de prueba, además establecieron que la aleación de aluminio AISI 6061 T6 cumple con las propiedades mecánicas necesarias para las condiciones de operación. Estas propiedades mecánicas permitirán, en un futuro cercano, la instalación de este dispositivo en máquinas que superen los 30 N.m de torque.

Por otro lado, la experiencia con los modelos de vibración permitió observar que el dispositivo no resonará con la frecuencia de giro de los motores eléctricos.

Se logró, además, crear un programa en PYTHON que permite al RASPBERRY PI recibir los datos obtenidos de las galgas extensiométricas a través del convertidor análogo digital HX711 y mediante los pines de entrada digitales. Adicionalmente, en el mismo programa, se pudo crear un servidor local con la capacidad de realizar el envío de datos en tiempo real, mediante el protocolo TCP/IP implementado en la librería SOCKET.

Para la recepción, análisis y recolección de datos se creó un programa con interfaz gráfica en LABVIEW, con la capacidad de conectarse a un servidor remoto mediante el protocolo TCP/IP.

Para corroborar que los programas mencionados funcionaran correctamente, se empleó una celda de carga con puente de Wheatstone completo. De esta forma se logró simular, en tiempo real, el funcionamiento del dispositivo y se pudo evidenciar que, para aumentar la tasa de datos obtenidos, se debe ejecutar el RASPBERRY PI mediante la consola de comando y no empleando el escritorio virtual.

9. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de un transductor de torques, mediante la aplicación de galgas extensiométricas y protocolo de comunicación IOT para la adquisición de datos en tiempo real y con los resultados obtenidos en el proyecto se puede concluir lo siguiente:

- La selección de alternativas demostró que el RASPBERRY PI es la mejor opción de microcontrolador para la aplicación deseada. Esto, debido a que tiene integrados los módulos de comunicación por WIFI y porque cuenta con librerías estables para la interacción con los convertidores análogo digitales y para la creación de servidores mediante protocolo TCP/IP.
- Los cálculos teóricos y computacionales demuestran que la aleación de aluminio AISI 6061 T6 es la indicada para la elaboración de este prototipo, debido a que cuenta con la suficiente resistencia mecánica para soportar las condiciones de trabajo planteadas y en un futuro, su posible escalamiento a condiciones de torques mayores a 30 N.m.
- Las verificaciones realizadas a las frecuencias de resonancia, demostraron que el dispositivo sufrirá daños debido a la frecuencia de rotación de los motores eléctricos.
- La comparación entre los cálculos teóricos y el modelo computacional, arrojó un error por debajo del 5%, con lo cual se pudieron validar los resultados obtenidos de la simulación computacional de los esfuerzos.
- El diseño final del dispositivo cumple con los requisitos de fácil fabricación y modularidad, lo cual permite el recambio de cualquiera de sus componentes, si es necesario, durante su vida útil.

- El programa creado en PHYTON, cumple a cabalidad con las necesidades de recolección y envío de datos en tiempo real, así como con la creación de un servidor estable para lo anteriormente mencionado.
- La interfaz creada en LABVIEW para servir como datalogger funciona de acuerdo con lo planteado, permitiendo un enlace estable con el servidor creado en RASPBERRY PI. También permite la visualización, mediante gráficos, de los datos obtenidos en tiempo real y la exportación de los datos a Excel.

10. RECOMENDACIONES

Todo proyecto debe ser objeto de una mejora continua y este no se queda atrás. Por lo tanto, se recomienda a futuros estudiantes ,que tengan interés en este proyecto, realizar la fabricación del prototipo de acuerdo con los planos de detalle que se encuentran en el anexo.

Otra recomendación, bastante importante, es generar una metodología que permita la calibración, en tiempo real, de los valores de referencia del software para mantener constante el valor de inicio de la medición.

También se recomienda indagar sobre la posibilidad de agregar otros tipos de sensores que no solo permitan determinar el torque en tiempo real, sino que también permitan la determinación de variables adicionales como la velocidad de rotación de eje y la potencia del equipo.

Adicionalmente, se recomienda verificar las frecuencias de resonancia del dispositivo mediante el análisis de vibraciones, una vez se tenga un prototipo físico para, de esta manera, validar los resultados obtenidos en las simulaciones.

11. BIBLIOGRAFIA

- Aghili, F., Buehler, M. & Hollerbach, J. M. (2001). "Design of a hollow hexaform torque sensor for robot joints". *Int. J. Rob. Res.*, vol. 20, no. 12, pp. 967–976.
- Bedford, A., Liechti, K. M., Bustos, H. G. & Infante, A. (2002). *Mecánica de Materiales*. Pearson Educación.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2010). *Mecánica de materiales* (No. TA405. B43 1994.). Mc Graw Hill
- Bojtos, A. & Szakály, N. (2016). "Photoelastic Torque Sensor Development for Measurement of Starting Torque of a DC Micromotor". *Procedia Eng.*, vol. 168, pp. 1358–1361.
- Budynas, R. G. & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Vol. 6. McGraw-Hill Interamericana.
- Cortés, V. (2019). *Un nuevo sensor de torque para caracterización de turbina hidrocínética*. Universidad de Chile.
- Dcruz, Patel, Labde, Kallur & Ambhore (2013). "Design, Fabrication and Analysis of Torque Transducer". Vol. 2, no. 3, pp. 129–134.
- Díaz, Álvarez, Ariza & Barreto (2010). "Metodología de diseño conceptual para la selección de un sistema manipulador de tambores para camiones de carga". *Prospectiva*, vol. 8, no. 1, pp. 53–62.
- Evans, D. (2011). *Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*. Disponible en <http://www.cisco.com>.
- Fundación Bankinter (2011). "El Internet de las Cosas". *Future Trends Forum*, No. 2, p. 77.

- Gero, M. B. (1999). Análisis de torsión uniformes. Oviedo, Principado de Asturias: Universidad de Oviedo.
- Hoffmann, K. (2009). "An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. The definitive work on strain gauge measurement". HBM Test Meas.
- IBM (2020 a). Protocolos TCP/IP. Disponible en https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/ssw_aix_72/network/tcpip_protocols.html.
- IBM (2020 b). "What is a TCP/IP Socket Connection?". Disponible en https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSB27H_6.2.0/fa2ti_what_is_socket_connection.html.
- Lebow (2006). "Lebow Products Full Line Catalog 15th Edition, 2006". Disponible en http://www.fedtec.com.tw/files/Lebow2006_catalog.pdf.
- Logicbus (2020). "Sensores de torque Futek | Logicbus". Disponible en https://www.logicbus.com.mx/torque_sensor.php.
- Menke, T. (2016). "Development of a Combined Measurement System for Torque and Angular Position". Procedia Technol., vol. 26, pp. 136–143.
- Micro-Measurements (2016). "Precision Strain Gages and Sensors". Disponible en <http://www.micro-measurements.ca/pdf/strain/precision-strain-gages-sensors-tee-rosettes.pdf>
- Mott, R. L., Salas, R. N., Flores, M. A. R. & Martínez, E. B. (2009). Resistencia de materiales. Vol. 5. Pearson Educación.
- Norton, R. L. (2011). Diseño de máquinas. México: Prentice Hall.

- Omega (2020) "Galgas extensiométricas". Disponible en <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html>.
- Ortuño Lizano , D. (2018). Diseño de un sensor de fuerza / torque para la base móvil de un robot humanoide. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio: Universidad de Costa Rica.
- Palma, V. & Rebolledo, R. (2018). "Diseño y construcción de un instrumento para medir la fuerza de empuje y el torque en motores de drones".
- Pérez, Insignares, Charris, Aguilar & Silgado (2014). "Medición del torque durante la soldadura por fricción-agitación de aluminio mediante un sistema de detección con transmisión en tiempo real." Rev. Colomb. Mater., No. 5, pp. 244–249.
- Ramírez, L. G., Jiménez, G. S. & Carreño, J. M. (2014). Sensores y actuadores. Grupo Editorial Patria.
- Renado, L. C. (2019). Reseña del libro "Internet de las cosas" de Moisés Barrio Andrés (2018), Editorial Reus. IDP, 131.
- Robledano, A. (2019). "Qué es TCP/IP". Disponible en <https://openwebinars.net/blog/que-es-tcpip/>.
- Ruiz, M. C., & Díaz, E. B. (2015). Resistencia de materiales. Barcelona: CIMNE.
- Salazar, J. & Silvestre, S. (2016). Internet de las cosas. Techpedia. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická.
- Sensing (2019). "Sensores de par y torsión". Disponible en <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-par-y-torsion/>.

Techtarget (2020). Internet de las cosas (IoT). Disponible en:
<https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Internet-de-las-cosas-IoT>.

Unuth, N, (2020). "TCP (Transmission Control Protocol) Explained". Disponible en
<https://www.lifewire.com/tcp-transmission-control-protocol-3426736>.

ANEXO A

Codigo en PYTHON 3.0 para el envio de datos mediante terminal remota:

```
#!/usr/bin/python3

import sys

import RPi.GPIO as GPIO

import time

from scale import Scale

# recolectar datos del HX711

scale= Scale()

scale.setReferenceUnit(-1000)

while True:

    try:

        ta=scale.getMeasure()

        print ("{0: 4.4f}".format(ta))

    except:

        GPIO.cleanup()

        break
```

ANEXO B

Código en PYTHON para el envío de datos mediante protocolo TCP/IP a interfaz en

LABVIEW

```
#!/usr/bin/python3
```

```
import sys
```

```
import RPi.GPIO as GPIO
```

```
import socket
```

```
import time
```

```
from scale import Scale
```

```
# Establecer conexion con el servidor remoto con ayuda de labview
```

```
socket_s= socket.socket()
```

```
host=""
```

```
port= 1557
```

```
backlog=5
```

```
socket_s.bind ((host, port))
```

```
socket_s.listen (backlog)
```

```
print ("Esperando una conexion :!")
```

```
socket_s, (host, port)=socket_s.accept()
```

```
print ("Conexion establecida :)")
```

```
# recolectar datos del HX711
```

```

scale= Scale()

scale.setReferenceUnit(-1000)

while True:

    try:

        ta=scale.getMeasure()

        if (-100<ta<100):

            t =(scale.getMeasure())

            ts=str(t)

            socket_s.send(str.encode(ts))

    except:

        print ("DESCONECTADO ..... :")

        socket_s.close()

        GPIO.cleanup()

        break

```

ANEXO C

Código en diagramas de bloques de LABVIEW para la recepción de datos:

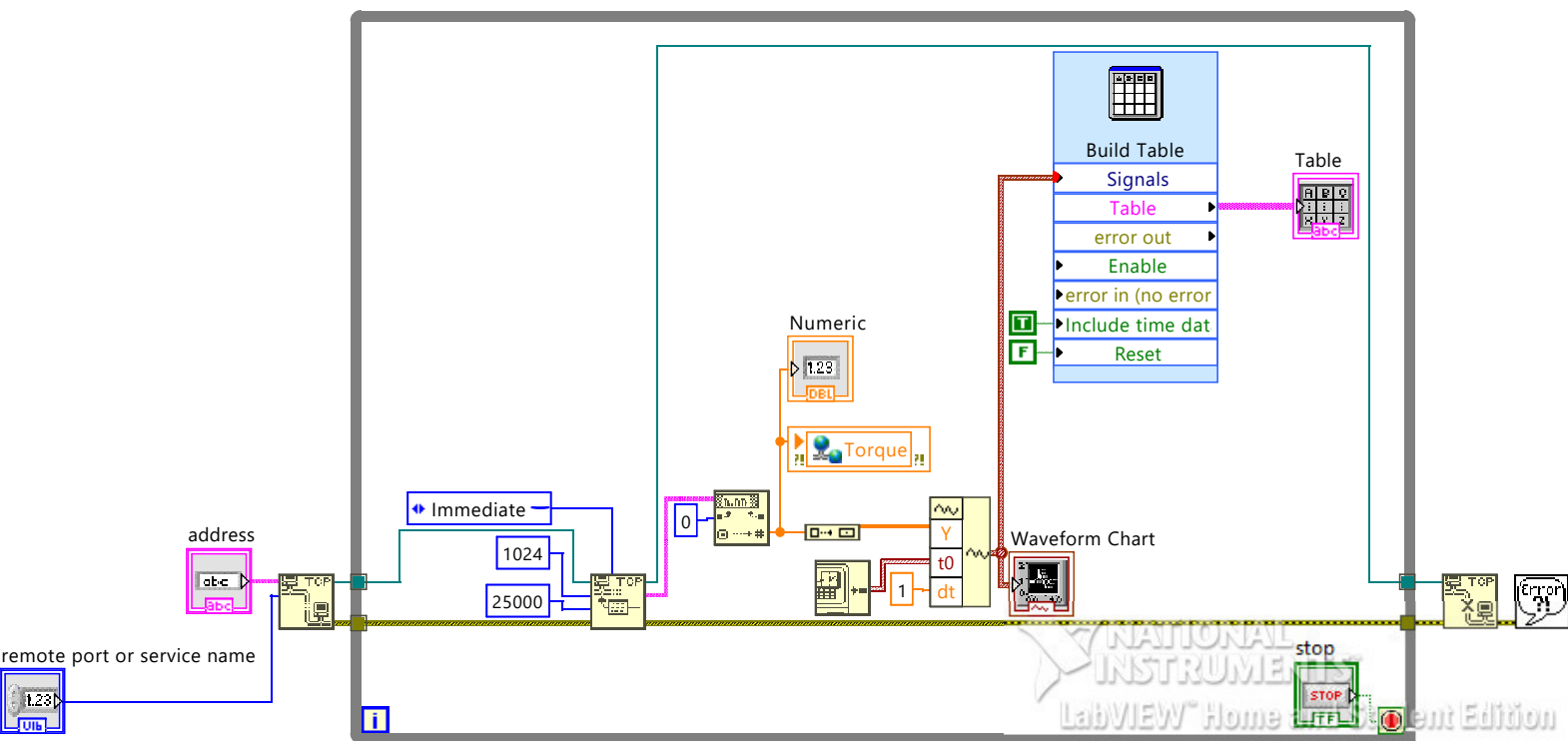


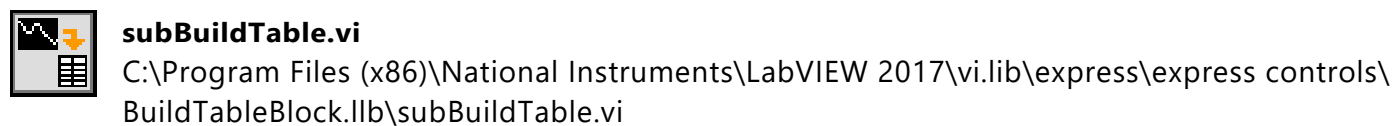
torque.vi

D:\Documentos\TESIS\labview\torque.vi

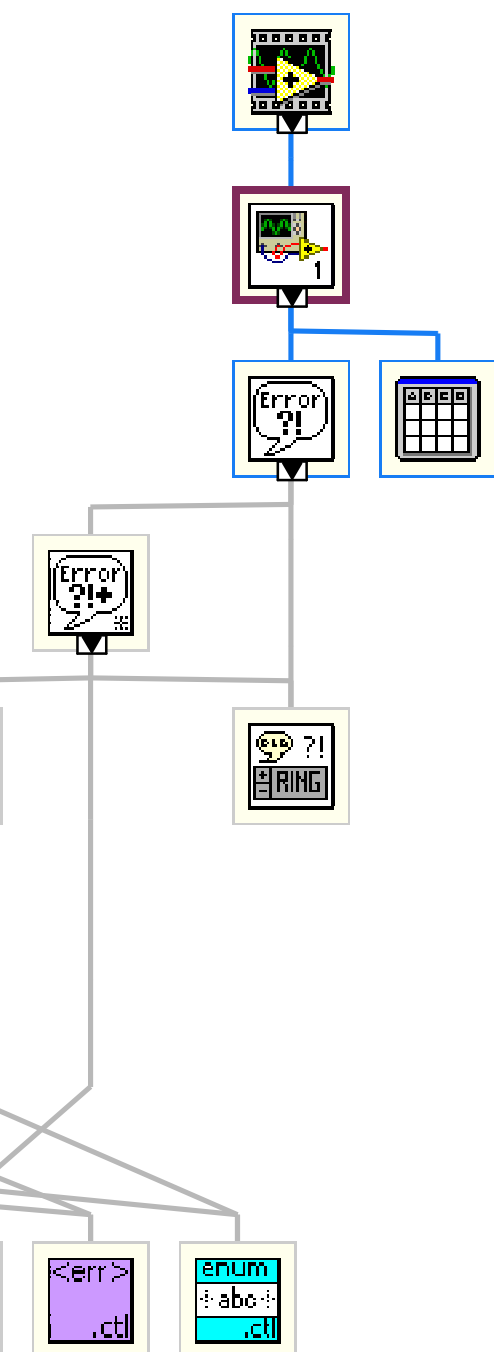
Last modified on 10/03/2019 at 2:24 p. m.

Printed on 25/05/2020 at 2:39 p. m.





Printed on 25/05/2020 at 2:39 p. m.





torque.vi

D:\Documentos\TESIS\labview\torque.vi

Last modified on 10/03/2019 at 2:24 p. m.

Printed on 25/05/2020 at 2:39 p. m.



Simple Error Handler.vi

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2017\vi.lib\Utility\error.llb\Simple Error Handler.vi

"torque.vi History"

Current Revision: 3

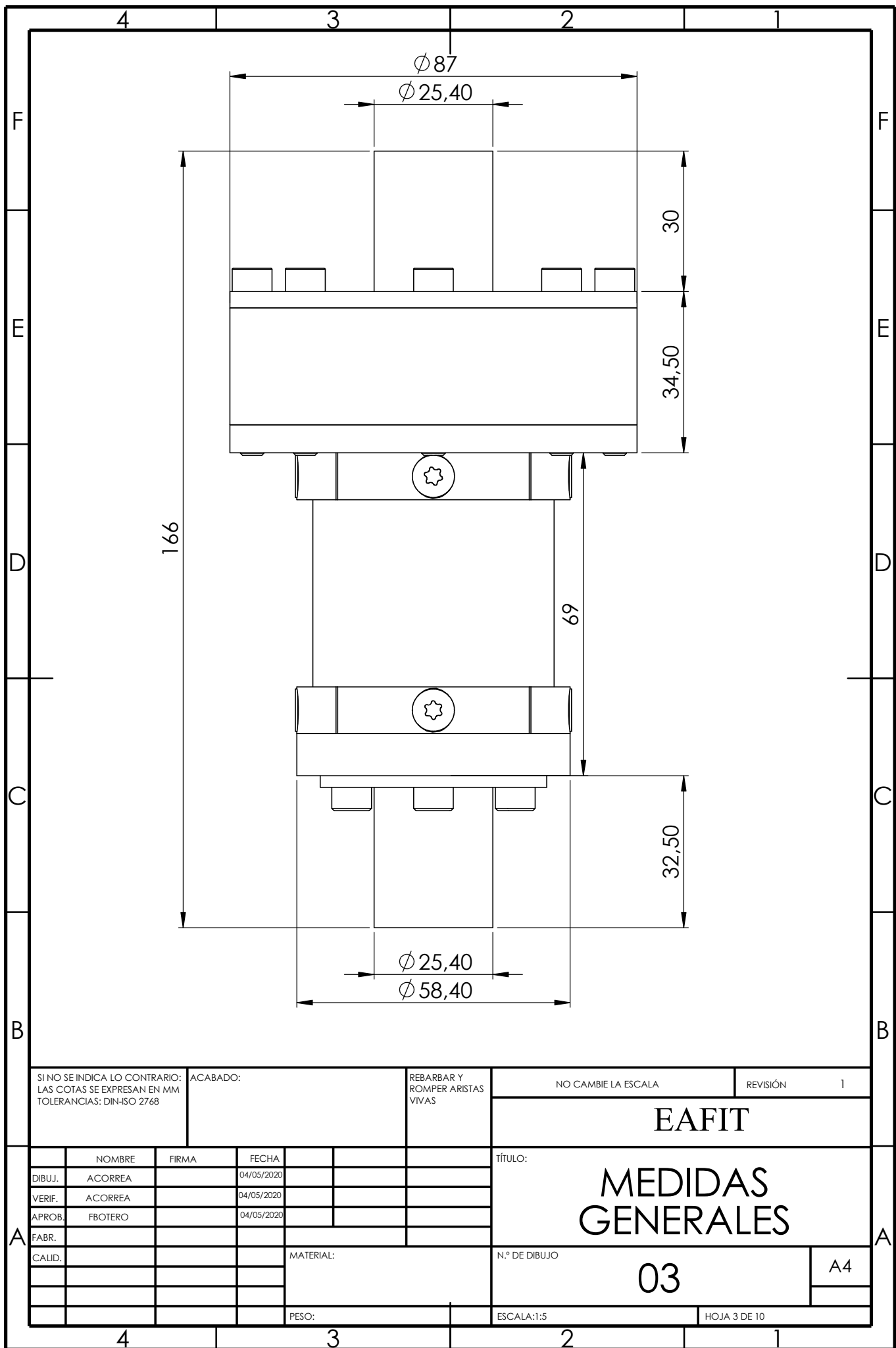
ANEXO D

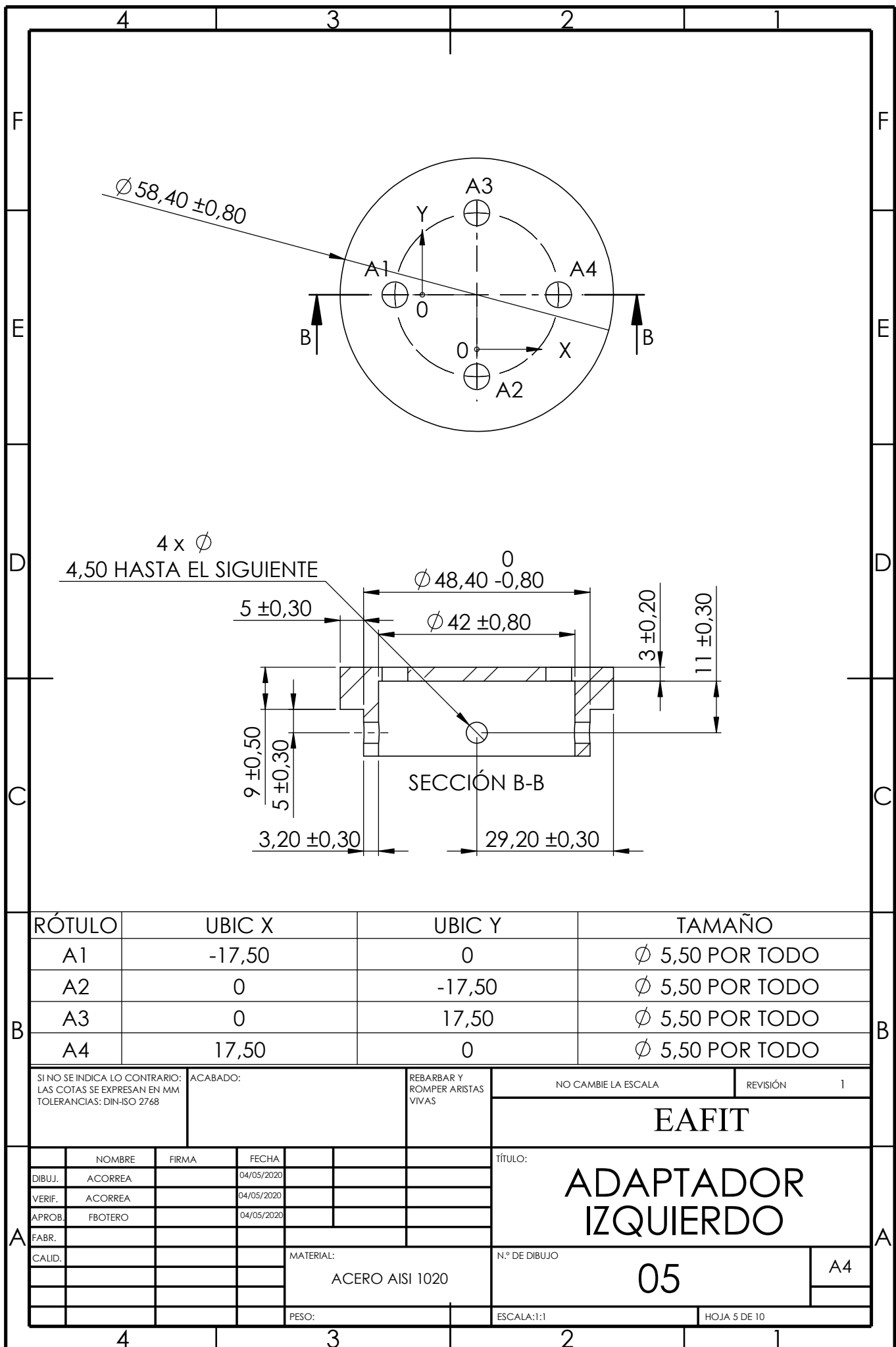
Planos de fabricación detallada

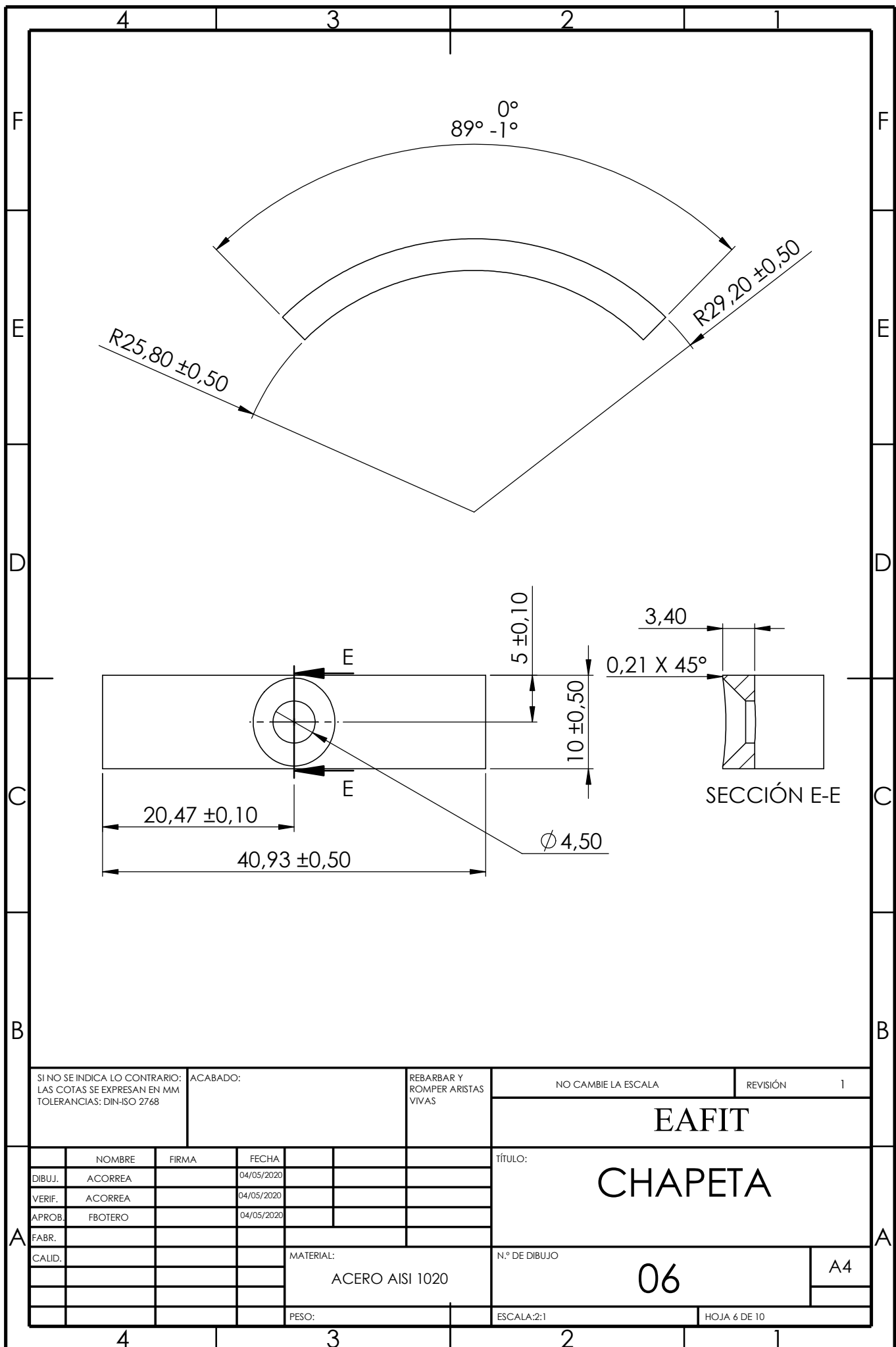
4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
	C		C
B			B
A			A

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	SOPORTE RASP BERRY	NYLON	1
2	ADAPTADOR DERECHO	AISI 1020	1
3	ACOPLE DERECHO	AISI 1020	1
4	TORNILLO ALLEN M5 x 35	ACERO	8
5	ADAPTADOR IZQUIERDO	AISI 1020	1
6	TUBO CENTRAL	AISI 6061 T6	1
7	CHAPETAS	AISI 1020	8
8	TORNILLO AVELLANADO M4X 8	ACERO	8
9	ADAPTADOR IZQUIERDO	AISI 1020	1
10	TORNILLO ALLEN M5 x 8	ACERO	4

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: DIN-ISO 2768	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN 1
EAFIT				
EXPLOSIONADO				
DIBUJ.	ACORREA	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
VERIF.	ACORREA		04/05/2020	02
APROB.	FBOTERO		04/05/2020	
FABR.				
CALID.				
		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO
		SEGUN TABLA		A4
PESO: 223 Gramos		ESCALA: 1:2		HOJA 2 DE 10







SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
TOLERANCIAS: DIN-ISO 2768

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

1

EAFIT

TÍTULO:

CHAPETA

	NOMBRE	FIRMA	FECHA			
DIBUJ.	ACORREA		04/05/2020			
VERIF.	ACORREA		04/05/2020			
APROB.	FBOTERO		04/05/2020			
FABR.						
CALID.						

MATERIAL:

ACERO AISI 1020

N.º DE DIBUJO

06

A4

PESO:

ESCALA:2:1

HOJA 6 DE 10

